

Estudo Comportamental de Asnas de Cobertura

Palladianas

Casos de Estudo da Igreja de S. Roque, Sé Catedral de Santarém e
Asilo Militar de Runa

Pedro Filipe Garcia Lopes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Militar

Orientadores: Professor Doutor António Manuel Candeias de Sousa Gago

Mestre João Carlos Sarrazola Martins

Júri

Presidente: Professor Doutor Fernando Manuel Fernandes Simões

Orientador: Professor Doutor António Manuel Candeias de Sousa Gago

Vogais: Professor Doutor Luís Manuel Coelho Guerreiro

Tenente-Coronel João Carlos Martins Rei

Outubro 2014

Agradecimentos

Expresso um profundo agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor António Sousa Gago, que sempre esteve disponível para me guiar, aconselhar e ajudar no desenvolvimento deste trabalho. O mesmo agradecimento para com o meu Coorientador, Mestre João Sarrazola Martins que me acompanhou, esteve sempre disponível e, foi incansável nas explicações acerca do tema, transmitindo-me todo o seu conhecimento em prol deste trabalho.

Agradeço também a colaboração fundamental que tiveram para este trabalho a Dra. Helena Alexandra Mantas - Diretora do Serviço de Públicos e Desenvolvimento Cultural - Direção da Cultura da SCML, responsável pela visita à Igreja de S. Roque; à Dra. Eva Raquel Neves - Comissão Diocesana para os Bens Culturais da Igreja, que possibilitou a visita à cobertura da Sé Catedral de Santarém, e por último ao IASFA, entidade responsável pelo Asilo Militar de Runa, que possibilitou a visita ao edifício e respetiva cobertura.

Agradeço a todos os professores que, ao longo do curso, se disponibilizaram para me ajudar e me deram todas as capacidades e competências para realizar este trabalho. Ao meu diretor de curso, Tenente-Coronel de Engenharia Gomes pelo apoio e, ao meu comandante de Companhia, Capitão de GNR Infantaria Hermenegildo pela disponibilidade ao longo dos últimos dois anos.

Ainda um agradecimento a todos os camaradas que me acompanharam durante todo o meu percurso na Academia, aos meus familiares e amigos pelo incentivo e apoio em todos os momentos.

Por último, e a quem dedico este trabalho - os meus pais, por me acompanharem, compreenderem, apoiarem e ajudarem em todos os momentos, incondicionalmente.

Resumo

O presente trabalho tem em vista o estudo do comportamento estrutural de asnas de cobertura *palladianas*, sustentado na atual regulamentação aplicável a estruturas de madeira – Eurocódigo 5 - e baseado num levantamento histórico deste tipo de coberturas em Portugal.

O estudo das estruturas de cobertura de madeira engloba a análise ao material em si, suas características, propriedades físicas e mecânicas, bem como o seu comportamento enquanto material estrutural. É ainda feito um levantamento histórico da evolução das coberturas de madeira e como este tipo de estrutura acompanhou o desenvolvimento da humanidade, até chegar aos nossos dias enquanto património de elevado valor histórico e cultural.

A análise das coberturas de madeira baseia-se nas indicações do Eurocódigo 5, em particular na parte 1-1 desse regulamento, que apresenta as regras básicas para o cálculo e dimensionamento de estruturas de madeira.

Aprofundou-se o estudo às asnas *palladianas*, tipo de estrutura do século XV, que está presente em diversas coberturas portuguesas. São estudados todos os seus elementos constituintes e identificadas as respetivas funções estruturais, onde se inclui a avaliação do comportamento de algumas variantes que este tipo de asna pode apresentar. O estudo e análises apoiam-se, também, em três casos de estudo: a Igreja de S. Roque em Lisboa, a Sé Catedral em Santarém e o edifício do Asilo Militar em Runa, e esses casos de estudo correspondem a asnas do mesmo tipo, com diferenças geométricas e de alguns detalhes construtivos, o que permite aprofundar o conhecimento acerca do funcionamento estrutural deste tipo de asnas.

Palavras-chave: Estruturas de madeira, Coberturas, Eurocódigo 5, Asna *palladiana*

Abstract

The current work aims to study the structural behavior of Palladian roof trusses, based on the current regulations on timber structures – Eurocode 5- and in historical research of this kind of roofs in Portugal.

The study of timber roof structures encompasses the analysis of the material in itself, its characteristics, physical and mechanical properties, as well as its behavior as a structural material. It is also made an historical research of the evolution of timber roofs and how this kind of structure accompanied mankind's evolution until today where it represents a heritage with high historical and cultural value.

The analysis of timber roofs is based in Eurocode 5, in particular part 1-1 of that regulation, which lays the basic rules for the calculation and dimension of timber structures.

The study of Palladian trusses is examined in detail; this structure dates from the 15th century and is present in several Portuguese roofs. Its constituent elements are studied and the according structural functions are identified, including the behavior assessment of some variants that this kind of truss may have. The study and the analysis are also based in the analysis of three case studies: S Roque Church in Lisbon, the Santarém's Cathedral and the Military Asylum in Runa. These case studies have the same kind of truss, with geometrical differences and some building details, what enables the improvement of the knowledge about the structural functioning of this kind of trusses.

Keywords: Timber Structures, Timber roofs, Eurocode 5, *Palladian* Trusses

Índice

1. Introdução	1
1.1. Objetivo da Dissertação	2
1.2. Organização da Dissertação	2
2. Enquadramento do Tema	5
2.1. A Madeira, Características e Propriedades	5
2.2. A Madeira Como Material Estrutural	9
2.2.1. Evolução das Coberturas de Madeira	10
2.2.2. Asna <i>Palladiana</i>	16
2.2.3. Evolução do Cálculo e Regras de Dimensionamento	20
3. Verificação da Segurança Estrutural em Coberturas de Madeira	23
3.1. Bases para o Cálculo de Ações	24
3.2. Verificações de segurança segundo o Eurocódigo 5.....	29
3.2.1. Estado Limite Último.....	29
3.2.2. Estado Limite de Serviço.....	31
3.3. Modelo de Elementos Finitos	32
4. Casos de Estudo.....	39
4.1. Caso de Estudo 1 – Igreja de S. Roque em Lisboa	39
4.1.1. Resenha Histórica	39
4.1.2. A Cobertura	40
4.1.3. Análise Estrutural	43
4.1.3.1. Propriedades dos Materiais.....	43
4.1.3.2. Quantificação das Ações.....	44
4.1.3.3. Modelo de Cálculo	45
4.1.3.4. Cargas Atuantes.....	47
4.1.3.5. Resultados e Verificações de Segurança Estrutural.....	48
4.2. Caso de Estudo 2 - Sé Catedral de Santarém	51
4.2.1. Resenha Histórica	51
4.2.2. A Cobertura	53
4.2.3. Análise Estrutural	54

4.2.3.1.	Propriedades dos Materiais.....	54
4.2.3.2.	Quantificação das Ações.....	55
4.2.3.3.	Modelo de Cálculo.....	57
4.2.3.4.	Cargas Atuantes.....	59
4.2.3.5.	Resultados e Verificações de Segurança Estrutural.....	60
4.3.	Caso de Estudo 3 – Edifício do Asilo Militar em Runa.....	63
4.3.1.	Resenha Histórica	63
4.3.2.	A Cobertura	64
4.3.3.	Análise Estrutural	66
4.3.3.1.	Propriedades dos Materiais.....	66
4.3.3.2.	Quantificação das Ações.....	67
4.3.3.3.	Modelo de Cálculo.....	69
4.3.3.4.	Cargas Atuantes.....	71
4.3.3.5.	Resultados e Verificações de Segurança Estrutural.....	72
5.	Discussão e Análise de Resultados.....	75
5.1.	Análise dos Resultados dos <i>Casos de Estudo</i>	76
5.2.	Proposta de Reforço da Asna do Asilo Militar de Runa	80
6.	Conclusões e Desenvolvimento Futuros	85
6.1.	Conclusões.....	85
6.2.	Desenvolvimentos Futuros.....	87

Índice de Figuras

Figura 1 – Direções a ter em conta no estudo da madeira	5
Figura 2 – Comportamento da madeira relativo à relação carga-deslocamento	7
Figura 3 – Lenho da resinosa	8
Figura 4 – Cobertura simples	11
Figura 5 – Cobertura com madres	11
Figura 6 – Evolução para duas águas do telhado de trouxa	12
Figura 7 - Ligação da asna de pernas e fileira	12
Figura 8 – Ligação à meia madeira da asna de pernas e nível ou asnas de nível	13
Figura 9 – Diagrama de carga e esforços resultante	13
Figura 10 – Cobertura de asnaria com asnas de nível – Igreja de São Francisco em Mogadouro, início do séc. XVII, reconstruída no séc. XX pela DGEMN	14
Figura 11 – Tipos de asnas pensados por Serlio	15
Figura 12 – Elementos constituintes da asna <i>palladiana</i> comum	17
Figura 13 – Tipos de empalmes – exemplos	18
Figura 14 – Tipos de acoplamentos - exemplos	19
Figura 15 – Exemplo de samblagem entre quatro elementos	19
Figura 16 – Pormenor da ligação da <i>perna</i> à <i>linha</i>	19
Figura 17 – Método de traçado de coberturas de San Nicolás	20
Figura 18 – Modelo de cálculo de estruturas de madeira	24
Figura 19 – C_{pi} de sucção	26
Figura 20 – C_{pi} de pressão	27
Figura 21 – Zonas em coberturas de duas vertentes	27
Figura 22 – Convenção de sinais para a pressão exterior	27
Figura 23 – Esquema final de pressão na cobertura	28
Figura 24 – Componentes da deformação	32
Figura 25 – Definição dos materiais	33
Figura 26 – Introdução dos elementos	33
Figura 27 – Inserção das características de cada elemento	33
Figura 28 – Hipótese de modelação 1	34

Figura 29 – Deformada do modelo da hipótese 1	34
Figura 30 – Hipótese de modelação 2	35
Figura 31 – Hipótese de modelação 3	35
Figura 32 – Deslocamentos do modelo 3	36
Figura 33 – Cravos utilizados neste tipo de estrutura	36
Figura 34 – Fachada da igreja de S. Roque	40
Figura 35 – Tipologia de asna da igreja de S. Roque	41
Figura 36 – Dimensões da asna tipo da igreja de S. Roque	41
Figura 37 – Cobertura da igreja de S. Roque	42
Figura 38 – Valores finais de pressão em kN/m ² da cobertura da igreja de S. Roque	45
Figura 39 – Carga distribuída ao longo das madres em kN/m	45
Figura 40 – Esforços atuantes relativos ao vento, em cada madre da asna	45
Figura 41 – Modelo de encaminhamento de cargas da cobertura da igreja de S. Roque	46
Figura 42 – Forças atuantes na asna da igreja de S. Roque	46
Figura 43 – Modelo numérico da asna da igreja de S. Roque - 2D	47
Figura 44 – Modelo numérico em 3D	47
Figura 45 - Comprimento dos elementos em análise	51
Figura 46 – Planta da nave e capelas da Sé Catedral de Santarém	52
Figura 47 - Fachada principal da Sé Catedral de Santarém	52
Figura 48 – Asna-tipo da Sé Catedral de Santarém	53
Figura 49 – Cobertura da Sé Catedral de Santarém	54
Figura 50 – Apoio do forro e teto, inferiores à estrutura, na linha	54
Figura 51 – Valor final de pressão da cobertura da Sé Catedral de Santarém	56
Figura 52 – Carga distribuída ao longo das madres em kN/m – desenho do autor	57
Figura 53 – Esforço atuante em cada madre relativo à ação do vento	57
Figura 54 – Modelo de encaminhamento das cargas da cobertura da Sé Catedral de Santarém	58
Figura 55 – Forças atuantes na asna da Sé Catedral de Santarém	58
Figura 56 – Modelo numérico da Sé Catedral de Santarém - 2D	59
Figura 57 - Modelo 3D da asna da Sé de Santarém	59

Figura 58 – Comprimento dos elementos em análise.....	62
Figura 59 – Fachada principal do Asilo Militar de Runa.....	64
Figura 60 – Dimensões da asna-tipo do Asilo Militar de Runa	65
Figura 61 – Asna da cobertura do Asilo Militar de Runa.....	66
Figura 62 – Planta do edifício do Asilo Militar de Runa, coberto na maioria por asna <i>palladiana</i>	66
Figura 63 – Valor final de pressão da cobertura do Asilo Militar de Runa.....	69
Figura 64 – Ação do vento nas varas em kN/m	69
Figura 65 – Cargas pontuais transmitidas das varas às madres em kN	69
Figura 66 – Esforços atuantes nas madres devido à ação do vento	69
Figura 67 – Modelo de encaminhamento das cargas do Asilo Militar de Runa.....	70
Figura 68 - Esforços atuantes na asna-tipo do Asilo Militar de Runa	70
Figura 69 – Modelo numérico 2D da asna do Asilo Militar de Runa	71
Figura 70 – Modelo 3D da asna do Asilo Militar de Runa.....	71
Figura 71 - Comprimento dos elementos em análise	74
Figura 72 – Diagrama qualitativo de esforços axiais da asna <i>palladiana</i>	76
Figura 73 - Solução de reforço da asna do Asilo Militar de Runa.....	81
Figura 74 - Modelo numérico da solução de reforço de Runa	81
Figura 75 - Elementos improvisados de suporte da madre	83
Figura 76 - Reforço da linha improvisado	84

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Evolução das asnas de cobertura.....	16
Tabela 2 – Características dos elementos da asna <i>palladiana</i>	18
Tabela 3 – Regras de dimensionamento de asnas simples, em cm	21
Tabela 4 – Classes de duração das ações	24
Tabela 5 – Coeficientes parciais de segurança	25
Tabela 6 – Coeficientes ψ para edifícios	25
Tabela 7 – Valores de k_{mod}	25
Tabela 8 – Restante carga permanente na cobertura segundo as Tabelas Técnicas	26
Tabela 9 – Sobrecarga de cobertura a considerar segundo o Eurocódigo 1	26
Tabela 10 – Valores-limite de deformação para vigas segundo o EC5.....	32
Tabela 11 – Características da asna-tipo da igreja de S. Roque	42
Tabela 12 – Classificação da madeira da cobertura da igreja de S. Roque.....	43
Tabela 13 – Propriedades mecânicas de resistência da madeira da asna da igreja de S. Roque	43
Tabela 14 – Propriedades mecânicas de rigidez da madeira da asna da igreja de S. Roque ...	43
Tabela 15 – Propriedades dos elementos estruturais da igreja de S. Roque	44
Tabela 16 – Coeficientes de pressão exterior para a cobertura da igreja de S. Roque	45
Tabela 17 – Ações atuantes relativos a G e SC	48
Tabela 18 – Ações totais atuantes por madre	48
Tabela 19 – Ações atuantes ao nível da base da cobertura - pavimento e teto.....	48
Tabela 20 - Esforços internos relativos ao estado limite último.....	48
Tabela 21 – Deslocamentos relativos ao estado limite de serviço	49
Tabela 22 – Valores-limite das deformações instantânea e final	51
Tabela 23 – Verificações da deformação instantânea e final	51
Tabela 24 – Características da asna-tipo da Sé Catedral de Santarém.....	53
Tabela 25 – Classificação da madeira da cobertura da Sé Catedral de Santarém.....	54
Tabela 26 – Propriedades mecânicas de resistência da madeira da asna da Sé Catedral de Santarém	55

Tabela 27 – Propriedades mecânicas de rigidez da madeira da asna da Sé Catedral de Santarém	55
Tabela 28 – Propriedades dos elementos estruturais da Sé de Santarém	55
Tabela 29 – Coeficientes de pressão exterior para a cobertura da Sé Catedral de Santarém ..	56
Tabela 30 – Cargas atuantes ao nível da cobertura relativas a cargas permanente, G e restante carga permanente, RCP.....	60
Tabela 31 – Cargas finais que atuam em cada madre	60
Tabela 32 – Cargas atuantes ao nível da base da asna, relativas ao pavimento e teto	60
Tabela 33 – Esforços internos relativos ao estado limite último	60
Tabela 34 – Deslocamentos relativos ao estado limite de serviço	61
Tabela 35 – Valores-limite das deformações instantânea e final	62
Tabela 36 - Valores da deformação instantânea e final	63
Tabela 37 - Característica da asna-tipo do Asilo Militar de Runa.....	65
Tabela 38 - Classificação da madeira da cobertura do Asilo Militar de Runa	67
Tabela 39 – Propriedades mecânicas de resistência da madeira da asna do Asilo Militar de Runa	67
Tabela 40 – Propriedades mecânicas de rigidez da madeira da asna do Asilo Militar de Runa	67
Tabela 41 – Propriedades dos elementos estruturais do Asilo Militar de Runa	68
Tabela 42 – Coeficientes de pressão exterior para a cobertura do Asilo Militar de Runa	69
Tabela 43 – Ações atuantes nas madres relativos à carga permanente e sobrecarga.....	72
Tabela 44 – Ações totais atuantes nas madres	72
Tabela 45 – Carga atuante no pavimento da cobertura	72
Tabela 46 – Esforços internos relativos ao estado limite último	72
Tabela 47 – Deslocamentos relativas ao estado limite de serviço	73
Tabela 48 – Valores-limite de deformação instantânea e final	74
Tabela 49 - Valores de deformação instantânea e final	74
Tabela 50 – Principais funções dos elementos constituintes da asna <i>palladiana</i>	76
Tabela 51 – Resultados das verificações de segurança de estado limite último para os casos de estudo.....	77
Tabela 52 – Resultados das verificações de segurança de estado limite de serviço para os casos de estudo.....	77

Tabela 53 – Comparação dos esforços axiais entre os três casos de estudo	78
Tabela 54 – Comparação dos esforços de flexão entre os três casos de estudo	78
Tabela 55 - Comparação de deformações entre os três casos de estudo	80
Tabela 56 - Esforços internos da asna do Asilo Militar de Runa com reforço	81
Tabela 57 - Deformações da asna do Asilo Militar de Runa com reforço.....	81
Tabela 58 - Valores limite de deformação instantânea e final	83
Tabela 59 - Valores de deformação instantânea e final da solução reforçada.....	83

Lista de Abreviaturas

Nesta dissertação adota-se a simbologia do Eurocódigo 5, parte 1.1, listada em seguida, para identificar de forma mais fácil cálculos, equações e símbolos apresentados ao longo da mesma.

Letras maiúsculas latinas

A – área da secção transversal do cravo

Comb. – Combinação de ações

$E_{0,mean}$ - Valor médio do módulo de elasticidade ao longo do veio

$E_{0,05}$ - Valor do módulo de elasticidade ao longo do veio de 95% da amostra

$E_{90,mean}$ - Valor médio do módulo de elasticidade na perpendicular ao veio

EC5 – Eurocódigo 5

F_{Ved} – Força de corte atuante

F_{Vrd} – Força de corte resistente

G – Carga permanente

G_{mean} - Valor médio do módulo de elasticidade transversal

L_{cr} – Comprimento de encurvadura do elemento;

Q_1 – Ação variável 1 – sobrecarga em cobertura não acessível

Q_2 – Ação variável 2 – Ação do vento em coberturas

RCP – Restante carga permanente

R_H – Reação horizontal

R_V – Reação vertical

SC – Sobrecarga

Letras minúsculas latinas

b – Largura da secção de madeira

$f_{c,0,d}$ - Valor de cálculo da resistência à compressão paralela ao fio

$f_{c,0,k}$ - Resistência à compressão na direção do veio

$f_{c,90,k}$ - Resistência à compressão na direção perpendicular ao veio

$f_{m,d}$ - Valor de cálculo da tensão resistente à flexão

$f_{m,k}$ - Resistência à flexão

$f_{t,0,d}$ - Valor de cálculo da resistência à tração paralela ao fio

$f_{t,0,k}$ - Resistência à tração na direção do veio

$f_{t,90,k}$ - Resistência à tração na direção perpendicular ao veio

f_{ub} – Tensão de rotura à tração do cravo

$f_{v,d}$ - Valor de cálculo da tensão resistente ao corte

$f_{v,k}$ - Resistência ao corte

h – Altura da secção de madeira

i_j – Raio de giração da secção transversal do elemento segundo o eixo j

$k_{c,i}$ - Fator de instabilidade

k_{cr} - Fator de redução da largura da secção de madeira

k_{def} – Fator de deformação

k_{mod} – Fator de modificação

p_p – Peso próprio do material

w – Módulo de flexão elástico

w_{fin} – Deformada final

w_{creep} – Deformada devido à fluência

w_{inst} – Deformada instantânea

Letras minúsculas gregas

α – Ângulo de abertura da asna

β_c – Fator que tem em conta a perda de retilinearidade das peças estruturais

γ_i – Coeficiente parcial de segurança correspondente ao material i

λ_j - Esbelteza

$\lambda_{rel,i}$ - Esbelteza normalizada

ρ_k - Densidade

ρ_{mean} - Densidade média

$\sigma_{c,0,d}$ - Valor de cálculo da tensão de compressão atuante paralela ao fio

$\sigma_{m,d}$ - Valor de cálculo da tensão atuante à flexão

$\sigma_{t,0,d}$ - Valor de cálculo da tensão de tração atuante paralela ao fio

τ_d - Tensão tangencial de cálculo

Utiliza-se ainda o símbolo @ para representar o afastamento entre asnas.

1. Introdução

A madeira desde cedo auxiliou o homem na sua evolução, servindo-lhe de instrumento de caça, permitindo-lhe transpor obstáculos e fornecendo-lhe abrigo. Se o homem evoluiu com o tempo, também a utilização da madeira enquanto material estrutural evoluiu com o homem, e com as novas necessidades quotidianas foram surgindo novos tipos de estruturas de madeira.

A madeira desde sempre se notabilizou por ser um excelente material estrutural, pois a sua razoável durabilidade, fácil trabalhabilidade, fácil obtenção e principalmente a sua boa resistência a esforços de flexão, tornaram-na no material de coberturas mais utilizado ao longo da história da humanidade. Embora tivesse outras utilizações na construção, a madeira foi sempre muito utilizada em coberturas, e existem hoje diversos factos e dados históricos de vários tipos de coberturas em todas as zonas do globo.

A compreensão das características físicas e propriedades mecânicas da madeira é essencial para a correta conceção e construção de estruturas de madeira. A estes aspetos juntam-se as verificações de segurança que se baseiam em modelos de avaliação do comportamento estrutural e em normas e regulamentos. Em Portugal nunca existiu um regulamento específico para estruturas de madeira, lacuna que veio a ser colmatada com o Eurocódigo 5 que, aliado às normas EN338 (Classes de Resistência) e EN1912 (estabelece correspondência entre classes de resistência e classes de qualidade visual para diversas espécies existentes), permitem que este material seja passível de ser utilizado estruturalmente.

Sendo a madeira um material complexo e com características particulares, é ainda relativamente pouco estudada, o que faz com que os regulamentos atuais ainda se baseiem, em algumas situações, em métodos empíricos, com regras e modelos de cálculo pouco fundamentados cientificamente.

A madeira tem características que a tornam num material muito vantajoso a nível estrutural e, embora a sua utilização tenha decaído com o aparecimento do betão e o aço, as suas possibilidades são imensas, o que faz da madeira um material com muito futuro, mas com poucos técnicos qualificados, capazes de fazer aumentar a sua utilização em estruturas. Hoje, esta tendência começa a inverter-se ao nível das grandes coberturas e pela mão de materiais compostos, como é o exemplo da madeira lamelada-colada.

Aliada à sua capacidade resistente e características únicas, a madeira é um material orgânico com reduzido impacto ambiental, baixo custo energético e baixo nível de poluição. Estes fatores podem alterar a forma como hoje em dia se olha para o material, pois torna-se imprescindível o seu uso não só para a reabilitação de estruturas antigas, como também em novas construções.

Neste trabalho desenvolve-se o estudo de estruturas de cobertura em madeira, mais concretamente as asnas *palladianas*. Este tipo de estrutura chega a Portugal no século XV,

proveniente de Itália, e surge com a necessidade de aumentar o vão a vencer pelas coberturas e de introduzir cargas ao longo da sua pendente. Este tipo de asnas, com elementos e geometria própria aparece em algumas coberturas portuguesas, justificando-se a avaliação do seu comportamento estrutural. Esta caracterização facilitará futuras operações de recuperação e reabilitação, pois saber-se-á, de antemão, quais as funções de cada um dos seus elementos.

Tendo em vista a caracterização do comportamento estrutural destes elementos, segue-se o Eurocódigo 5 parte 1-1: *General – Common rules and rules for buildings* (CEN, 2006), fazendo-se apenas uma análise plana da estrutura, não se abordando as temáticas da vibração, da resistência ao fogo e a resistência das ligações. Como referido, analisam-se três casos de estudo, de diferentes épocas e com características particulares, que permitiram comparar elementos constituintes, esforços internos e deformações produzidas.

1.1. Objetivo da Dissertação

Este trabalho tem como principal objetivo a caracterização comportamental das asnas *palladianas*, de acordo com os regulamentos e normas atuais. É também objeto de análise a evolução das coberturas de madeira ao longo da história, assim como, o estudo dos processos tradicionais de dimensionamento das mesmas.

De forma a sustentar o tema deste trabalho recorreu-se a três coberturas deste tipo, tendo-se estudado o comportamento estrutural das respetivas asnas, os processos de encaminhamento das cargas para os seus elementos e, avaliado, as ações atuantes nas mesmas. Com base nas normas europeias, caracterizaram-se as propriedades físicas e mecânicas da madeira destas coberturas e efetuou-se a verificação da segurança estrutural das respetivas asnas.

Por último, tendo em conta a não verificação da segurança estrutural num dos casos de estudo, estudou-se uma proposta de reforço.

1.2. Organização da Dissertação

A presente dissertação é apresentada em 6 capítulos, onde se desenvolveu a temática referida.

Após a introdução, o segundo capítulo faz referência às principais características da madeira, bem como as suas propriedades, comportamento estrutural e composição. Faz-se, ainda, referência à evolução da madeira enquanto material estrutural e à importância que teve para o homem, terminando com um levantamento histórico e evolutivo das coberturas de madeira. Neste capítulo faz-se também a caracterização da asna *palladiana* e descreve-se as principais regras de dimensionamento utilizadas na antiguidade.

O terceiro capítulo é dedicado à análise de segurança das estruturas de madeira pelo Eurocódigo 5 e às respetivas bases para o cálculo, entre elas, os tipos de ações a considerar, a definição dos seus parâmetros característicos, as combinações de ações a utilizar e, por último, as

verificações de estado limite último e serviço. Neste capítulo apresenta-se, ainda, o modelo numérico utilizado na caracterização estrutural deste tipo de asnas.

O quarto capítulo diz respeito aos casos de estudo. Inicia-se com o respetivo estudo histórico e com a descrição das características da cobertura, efetuando-se depois, a verificação da segurança estrutural, com a quantificação de ações, caracterização do modelo de cálculo e modelo numérico.

No quinto capítulo faz-se uma análise dos resultados obtidos, primeiro ao nível geral, caracterizando-se geometricamente a asna e o seu comportamento estrutural e, depois, ao nível dos casos de estudo, com comparação entre eles e discussão dos resultados obtidos. Propõe-se, ainda, uma solução de reforço de um dos casos, visto ser o mais condicionado do ponto de vista de estabilidade estrutural.

Por último, no sexto capítulo apresentam-se as notas finais e as conclusões acerca do trabalho realizado.

2. Enquadramento do Tema

2.1. A Madeira, Características e Propriedades

A madeira tal como está patente no dicionário é um material orgânico, compacto e duro, proveniente do lenho que compõe o tronco e alguns ramos de vegetais. A madeira é, por isso um material natural, formado pelo tecido de plantas lenhosas, resistente e leve, o que faz dela um material propício ao uso na construção.

A madeira é um material que desde sempre existiu na natureza, acompanhou o homem no seu desenvolvimento e o seu uso enquanto material de grande utilidade evoluiu com ele. O homem fez dela um dos primeiros materiais a ser trabalhado, olhando para este inicialmente como uma fonte de abrigo, passando por instrumento de caça e fonte de calor, até o transformar em papel e utilizá-lo na indústria naval assim como na construção de estruturas.

Inicialmente não era possível saber as propriedades que a caracterizavam enquanto material estrutural, e era apenas através do seu uso que se conseguia ter uma noção de como se comportava, o que não acontece hoje em dia, em que são do conhecimento geral as propriedades que a caracterizam, o que se torna indispensável para efetuar uma análise correta da madeira. Apesar de esta conter determinado tipo de propriedades físicas e mecânicas, estas não refletem as suas características na globalidade, e devem sim ser analisadas caso a caso, pois cada espécie, cada árvore, cada ramo tem características distintas, que também dependem do meio onde se inserem e do próprio crescimento da espécie.

A madeira é um material de estrutura fibroso, formado por fibras orientadas segundo uma direção, o que faz com que esta tenha também diferentes propriedades consoante a direção em estudo, que são essencialmente a direção do veio - longitudinal, a direção perpendicular ao veio – tangencial, e direção radial, Figura 1.

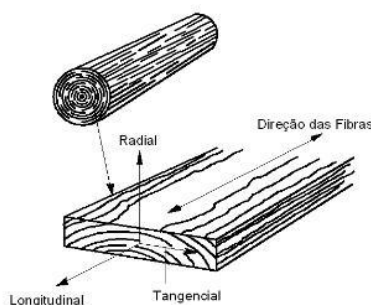


Figura 1 – Direções a ter em conta no estudo da madeira

Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfZEQAB/madeira-apostila-2012>

Pela característica mencionada anteriormente, a madeira classifica-se como um material anisotrópico e heterogéneo, o que lhe confere um comportamento particular. Para além destas, possui outras propriedades que a caracterizam, e são:

- Propriedades Físicas

Na análise da madeira como material estrutural, as propriedades físicas com maior relevância são: o teor em água e higroscopicidade¹; a massa volúmica aparente; a retratibilidade; e a reação e resistência ao fogo. Há ainda a referir que a madeira apresenta-se como um material com diversas tonalidades (castanha, branca, avermelhada entre outras); possui cheiro, uma vez que algumas espécies contêm óleo que lhe confere um aroma próprio; é um material flexível e se corretamente tratada tem grande durabilidade.

- Propriedades Mecânicas

Pelas características da madeira, o mais correto é avaliar as suas propriedades mecânicas de acordo com o seu comportamento face a determinado tipo de solicitação, e não ao elemento no global. As principais propriedades são a resistência à tração e compressão quando sujeita a carregamento da direção paralela ou perpendicular às fibras, resistência à flexão e ao corte, dureza, resistência à fadiga e fluência (Negrão & Faria, 2009).

O correto uso da madeira em estruturas implica o conhecimento destas propriedades, físicas e mecânicas, que informam sobretudo acerca da capacidade resistente que o material apresenta, e sendo este dos pontos mais importantes é de salientar os principais fatores influenciadores, tais como a espécie botânica, a localização dentro do lenho, a humidade, a massa volúmica e os defeitos que esta apresenta.

A espécie botânica tal como a idade da madeira é um fator importante, pois espécies distintas apresentam comportamentos distintos. Difícil de controlar em madeira antiga é o conhecimento das condições do seu crescimento, fator que hoje é tido em conta, e ao qual antigamente pouca importância se dava, o que afetaria a maioria das estruturas. Quanto à humidade², a resistência é máxima para um valor nulo de humidade, no entanto é importante manter a humidade da madeira em valores inferiores a 20% para evitar os ataques de fungos de podridão bem como de térmitas, que são os principais responsáveis pela sua degradação. A massa volúmica é importante, na medida em que permite a obtenção de outros parâmetros também eles importantes para caracterizar a madeira e este valor é tanto mais fidedigno quanto menores forem os defeitos do elemento, este que é outro dos fatores influenciadores da resistência. Por exemplo, a existência de nós influencia a capacidade de resistência à tração, pois estes locais, quando sujeitos à tração são mais suscetíveis a formarem fendas (Ramos, 2010).

¹ Material com capacidade de absorver água do ar (expande), e de a libertar por evaporação (retrai), consoante as variações de temperatura e pressão parcial de vapor de água do ambiente envolvente, estando assim em equilíbrio higroscópico com este.

² Na classe de serviço 1 – Ambiente Interior protegido – o valor médio do teor de água de equilíbrio para a maior parte das resinosas não excederá 12%.

Relativamente à análise da madeira enquanto material estrutural, este, consoante a carga atuante pode ser considerado como um material de comportamento elástico, o que significa que para determinado valor de carga aplicado, a madeira deforma-se mas assume a sua posição original quando as tensões atuantes são removidas. Este comportamento verifica-se até ao limite elástico. Caso este limite seja excedido, passa a existir uma parcela de deformação irrecuperável, com origem na estrutura interna do material (T. F. R. M. Martins, 2010).



Figura 2 – Comportamento da madeira relativo à relação carga-deslocamento – Adaptado de Martins 2010

Se para um elemento solicitado à tração acontece uma rotura frágil onde o comportamento do material é praticamente linear à rotura, a Figura 2 refere-se a um elemento genérico de madeira sujeito à compressão onde o mesmo não acontece, uma vez que a compressão se associa ao esmagamento das fibras. A partir daqui é possível demonstrar o que foi dito anteriormente, pois é visível a zona do gráfico correspondente à zona elástica onde o material apresenta um comportamento elástico. Ainda nesta zona começa por existir uma linearidade no comportamento da madeira, onde o carregamento é diretamente proporcional à deformação. Quando se aumenta a carga aplicada atinge-se o limite de proporcionalidade, a partir do qual a deformação aumenta com o aumento da carga mas de forma não proporcional. Se o valor da carga continuar a aumentar a madeira passa a ter um comportamento plástico, até ser atingido o ponto de carregamento máximo, valor a partir do qual o material entra em cedência e colapsa.

A partir do gráfico também podem ser retiradas informações importantes acerca da ductilidade do material e se este tem a capacidade de recuperar as deformações introduzidas pelo carregamento depois de este ser removido. Indica ainda o módulo de elasticidade do material, que se traduz pelo declive da reta que delimita a zona elástica.

Atendendo às propriedades acima descritas, a madeira torna-se um material mais complexo relativamente a outros utilizados na construção civil, o que implica um conhecimento técnico e científico vasto, não só na sua utilização mas também no seu corte e processamento, pois é necessário ter em conta a diversidade da madeira mesmo dentro da própria espécie.

Em função da estrutura anatómica, a madeira distingue-se em dois grandes grupos botânicos, as angiospérmicas, que se caracterizam por serem folhosas e de madeira dura (carvalho, castanho, eucalipto), e as gimnospérmicas, de que fazem parte as coníferas ou resinosas, e se caracterizam por possuírem folha persistente e frutos em forma de cone. Deste grupo fazem parte as espécies em análise neste trabalho, a riga, o pinheiro e o cedro, que são madeiras caracterizadas pela boa resistência à compressão e ainda melhor à tração e flexão (Negrão & Faria, 2009), o que faz com que sejam um bom material para estruturas.

Este tipo de árvore é caracterizado por ter um crescimento mais rápido, possibilitando o corte ao fim de 30 anos. Este rápido crescimento influencia a resistência e durabilidade da madeira, o que implica que tenham de ser tratadas depois do seu corte para que mantenham as suas propriedades. Por serem o tipo de árvore que se desenvolve mais rápido, é também aquele que mais aparece no mercado e com preços mais baixos.

A Figura 3 representa o lenho de uma espécie resinosa, onde é possível observar os dois anéis de crescimento que simbolizam um ciclo de crescimento, assim como os traqueídeos, que fazem com que este tipo de madeira seja mais macia uma vez que uniformizam a estrutura do lenho.

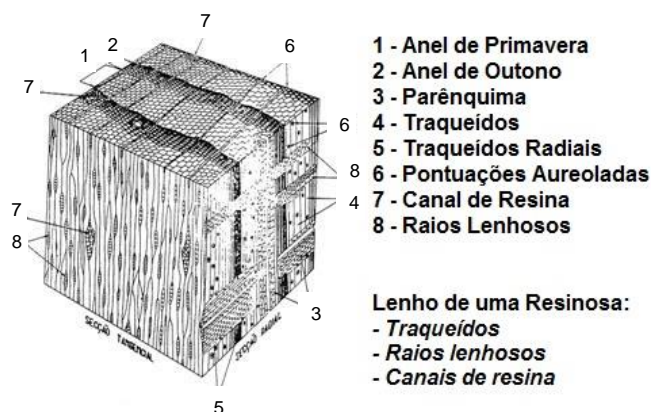


Figura 3 – Lenho da resinosa

Adaptado de <http://portaldamadeira.blogspot.pt/2009/10/estrutura-fibrosa-do-lenho.html>

Nos capítulos IX e X do Segundo Livro de Vitruvius³, – *De la mader a y del Abeto superior y inferior* do tratado *De Architectura*, incluem-se referências à madeira, em que este recomenda a escolha e corte da madeira entre o princípio do outono e o começo da primavera, corte este precedido de uma secagem da árvore através de uma incisão que permitisse a saída da seiva.

Hoje em dia, e mesmo com a inclusão no mercado de materiais sintéticos, a madeira continua a ser matéria-prima de referência e fonte de diversos produtos não só relacionados com a carpintaria e a construção civil. Neste campo a madeira apresenta mesmo vantagens face a outros materiais, tais como a durabilidade, e a possibilidade de reutilização (caso de cofragens),

³ Arquiteto romano que viveu no séc. I a.C. e deixou uma das obras mais marcantes para a Arquitetura – *De Architectura* com 10 volumes.

pois é um material facilmente manuseável e suscetível de ser trabalhado, para além de garantir segurança na sua utilização, uma vez que não oxida, e garante até uma boa resistência ao fogo. É ainda um material sustentável quando utilizado com regra e discernimento, e não necessita de mão-de-obra e técnicos qualificados face ao betão-armado. Outro dos fatores que pesa é a economia da madeira em virtude de outros materiais de construção.

Ainda assim existem também fatores que fazem, hoje em dia, da madeira um material com utilização decrescente no âmbito das estruturas de cobertura, tais como o crescimento da construção multifamiliar, em altura (reduz a área de cobertura por unidade habitacional), a crescente utilização de coberturas planas, a opção por coberturas leves, utilizando secções de madeira menores, e principalmente, a substituição de madeira por outros materiais – betão armado e betão pré-esforçado (Mateus, 2007). Outros dos fatores prendem-se com a escassez de madeira nacional caracterizada pela grande resistência, como o carvalho, ou de grandes secções como o pinho, e à deficiente secagem e tratamento destas madeiras. Também a falta de projetistas de estruturas de madeira tradicionais ajudou a este declínio (Mascarenhas, 2006).

Contudo a madeira é um material que se traduz numa excelente solução para estruturas de cobertura, uma vez que as asnas aproveitam a capacidade resistente principalmente à tração e flexão dos materiais lenhosos (Cabo, 1996).

2.2. A Madeira Como Material Estrutural

A madeira é um material abundante, barato, fácil de trabalhar e exibe qualidades que se adaptam às mais variadas exigências da construção. Antes do betão armado era praticamente o único material de estruturas presente nas edificações urbanas e rurais até à Revolução Industrial, mas na construção civil tinha também outras utilizações, como para meios auxiliares, ferramentas e máquinas.

Foi o primeiro material a ser utilizado pelo homem em virtude da sua abundância e circunstâncias especiais (Scala, 1895). Desde a pré-história sempre foi um material essencial ao homem e um garante de sobrevivência, possibilitando-lhe a construção de abrigos e ferramentas de caça. Foi através da vara e do tronco que lhe surgiu a possibilidade de vencer vãos, cobrir espaços que substituíssem a caverna e lhe dessem maior mobilidade. Surge então o primeiro conceito de viga, tão simples como o tronco de uma árvore que servia para atravessar um riacho (Mateus, 2007).

É através da madeira que nasce a arte de edificar habitações e com ela a arte da construção. Aparece primeiro a cabana, em que a estrutura resistente não passa de um conjunto de ramos ou canas inclinadas e unidas no topo, cobertas de folhas untadas com lodo ou colmo.

Desde a época clássica que se utilizavam secções completas de árvores, qualquer que fosse o fim a que se destinavam, isto atendendo às limitações da época, sendo também uma forma de

manter a resistência da peça. Com o aparecimento de ferramentas de liga metálica na Idade do Bronze, o homem começa a trabalhar a madeira e a dar-lhe as dimensões que lhe permitiram evoluir ao longo do tempo. E foi com o tronco seco e as suas fendas longitudinais alinhadas e profundas que o homem aprendeu que este poderia ser trabalhado, transformado em elementos ligeiros passíveis de serem adaptados às formas que entendesse. Esta aptidão foi cedo compreendida pelo homem, o que fez da carpintaria uma das primeiras profissões existentes, mesmo antes do pedreiro (Mateus, 2007).

No que diz respeito às estruturas de madeira e em particular às coberturas, a madeira era trabalhada precisamente por mestres carpinteiros, arte que se tornou profissionalmente reconhecida com os romanos através dos seus desenhos de pontes, coberturas, engenhos de elevação, cimbres entre outros. O seu trabalho passava não só pela conceção destes sistemas estruturais como também pela seleção das melhores árvores, altura de corte e secagem, para só depois passarem ao trabalho da madeira.

A madeira está, então, presente nos três grandes grupos da construção: muros e pilares, lajes de piso e coberturas. Os dois primeiros referem-se à construção vertical e horizontal, respetivamente e relacionam-se com o *homo erectus* e a sua necessidade de sobrevivência, as coberturas aparecem numa perspetiva mais confortável de melhoria das condições de vida ao desenvolverem-se planos inclinados a fim de evitar chuva e neve (Cabo, 1996).

O engenho do homem encontrou ao longo do tempo soluções extraordinariamente simples e eficientes, mesmo baseadas num conhecimento empírico das características e comportamento das estruturas de madeira. Foram transportadas até aos dias de hoje, perdurando no tempo, mantendo a madeira como uma matéria-prima de excelência na construção.

2.2.1. Evolução das Coberturas de Madeira

As asnas⁴ de madeira são elementos considerados fundamentais em coberturas quase há dois mil anos, pensa-se que desde a Grécia Antiga. Este elemento está relacionado com a treliça, que também é uma estrutura triangular constituída por elementos de barra e nós, aproveitando ao máximo o material, diminuindo os esforços que a envolvem e respondendo de forma eficiente à sua função estrutural. E são estes elementos que maioritariamente integram as asnas de madeira, suportando as coberturas dos edifícios e oferecendo as melhores condições de resistência (Costa, 1955).

Não é possível descrever com exatidão quando aparece a primeira asna como estrutura de cobertura, uma vez que é fruto de desenvolvimentos de ideias e conceitos empíricos, que foram sendo melhorados ao longo do tempo e aprimorados em edifícios e estruturas da Antiguidade. A

⁴Espécie de armação triangular, sobre a qual assenta o telhado – Dicionário da Língua Portuguesa

asna mais antiga ainda existente data do século VI, e aparece no Mosteiro de Sta. Catarina no Monte Sinai, Egito, tratando-se de uma asna triangular simples (Cabo, 1996). A asna de cobertura em treliça aparece assim em muitos monumentos e edifícios, sendo que são também muitas e variadas as formas que estas apresentam ao longo da sua evolução. É um facto que a origem e evolução da asna foi acompanhada pelo desenvolvimento da arquitetura (Cabo, 1996), daí ambos os conceitos estarem interligados, sendo impossível referenciar asnas de cobertura sem mencionar grandes obras da civilização.

O tipo de asna depende assim do tipo de edifício, do vão a vencer, das sobrecargas, das solicitações admitidas, dos tipos de apoio e da natureza da estrutura do edifício (Osa, 2009). A treliça original começou por ser de madeira e assim se manteve durante séculos, diferenciando-se as coberturas “à vista” das que não eram visíveis do interior do edifício, fator que também influenciaria o tipo de asna a utilizar.

À cobertura inicialmente construída dá-se o nome de *cobertura simples* (Osa, 2009), Figura 4, com apenas duas pernas inclinadas e ligadas no topo, na maioria das situações assentadas no solo e cuja principal característica é ser uma estrutura prática, fácil de construir e à medida dos materiais (árvores) existentes na proximidade. Este tipo de cobertura era utilizada pelo homem primitivo, normalmente executada em círculo revestida por colmo, e conferia um abrigo simples e fácil de construir.

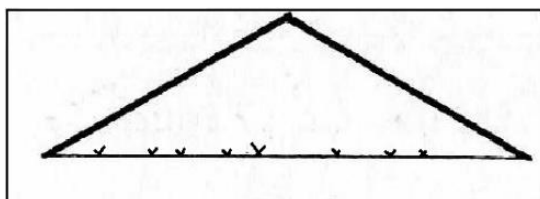


Figura 4 – Cobertura simples

Aparecem depois no Egito, 3000 a.C. (Oliveira, 2009), as coberturas com madres, Figura 5, formadas essencialmente por troncos de palmeira, em que a altura dos apoios – paredes laterais do edifício em argila – varia e o vão é ultrapassado através de madres, que funcionam predominantemente à flexão. De referir que neste caso as paredes do edifício têm função estrutural, e a cobertura assenta diretamente nas madres.

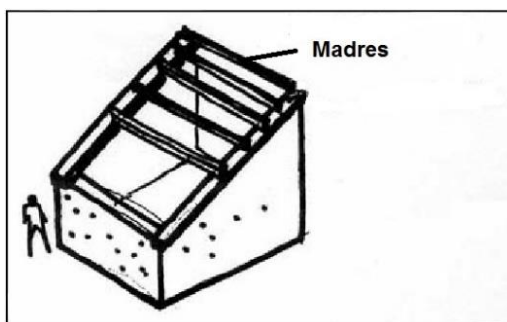


Figura 5 – Cobertura com madres – Adaptado de OSA, 2009

Posteriormente aparecem as primeiras coberturas em edifícios na Grécia e Babilónia⁵, ultrapassada que estava a Idade do Bronze; trocando-se a direção do elemento estrutural principal, obtém-se o denominado *telhado de trouxa*⁶ (Bluteau, 1712). Com vãos máximos de 12 metros, em que aparecem as *pernas* que apoiam nas paredes perpendiculares à linha de pendente da cobertura, ou em *madres*, em que o elemento estrutural resiste à flexão na direção da pendente da cobertura, Figura 6. Este tipo de cobertura foi a solução para edifícios com grande comprimento, adotando-se também em duas águas, em que a principal limitação reside no vão a vencer pelas *pernas*, ou seja, pelo tamanho das árvores disponíveis na época, tendo estas que assentar em paredes que, tal como no caso anterior, também são elementos estruturais, com a desvantagem de ser necessário uma parede ou pilar central, Figura 6.

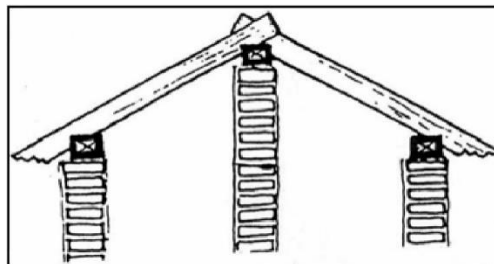


Figura 6 – Evolução para duas águas do telhado de trouxa – Adaptado de OSA, 2009

Ainda na Grécia Antiga, já no Período Clássico⁷, este aspeto da parede central foi resolvido com a construção de madeiramentos formados apenas por pernas de asna e fileira, este tipo de estruturas veio a denominar-se em Portugal por telhados de *asnaria* (J. S. Martins, Gago, Caldas, & Oliveira, 2013) em que a parede central é substituída por uma *trave de fileira*, Figura 7, que empalma as duas *pernas*, o que permite aumentar para o dobro o vão livre do edifício.

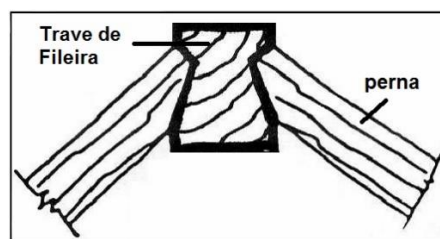


Figura 7 - Ligação da asna de pernas e fileira

Na Península Ibérica este tipo de cobertura, aparentemente, surge no período Visigodo⁸ por importação da europa central. Nas estruturas portuguesas, é frequente o travamento longitudinal

⁵ Entre 2000 a.C. e 1500 a.C. (Oliveira, 2009), com a Idade do Bronze a trazer as ferramentas que permitiram o primeiro manuseio da madeira.

⁶ Segundo a Descrição de Raphael Bluteau em 1712, “*telhado de hua água ou madeyrado de trouxa, leva hua madre ou trave pelo meyo para a madeyra não dar de si*”.

⁷ Período entre 500 a.C. e 338 a.C. dominado pelas *polis* Esparta e Atenas.

⁸ Dominaram a Península Ibérica entre o séc. V e o início do séc. VIII, quando se deu a invasão muçulmana.

ser assegurado pelo forro, o que significa a inexistência de *trave de fileira*, sendo a junção de *pernas* feita à *meia madeira*⁹, Figura 8.

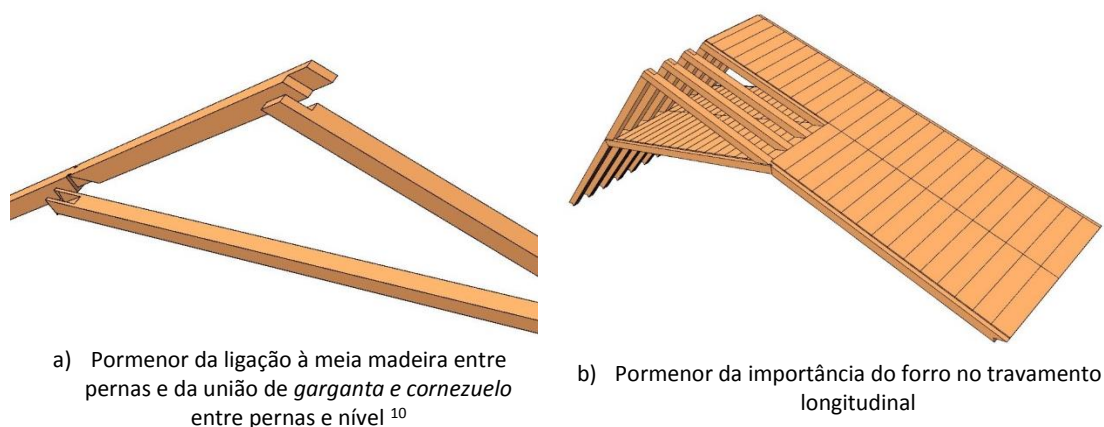


Figura 8 – Ligação à meia madeira da asna de pernas e nível ou asnas de nível – Desenhos de João Sarrazola

A supressão da parede central implica a introdução de esforços axiais de compressão nas *pernas* (com maior ordem de grandeza), que se decompõem em esforços verticais e horizontais nos apoios inferiores e superiores. E esta é uma das temáticas que origina a treliça – resolver o problema do esforço axial de compressão nos apoios das pernas, através da introdução de um elemento que as una, evitando a passagem de forças horizontais para as paredes permitindo a diminuição da sua espessura e consequentemente do seu peso próprio.

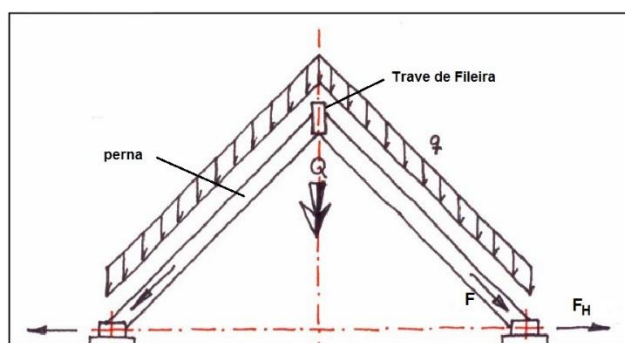


Figura 9 – Diagrama de carga e esforços resultantes – Adaptado de OSA 2009

Neste tipo de cobertura, quanto maior o vão, maior será a força F_H , Figura 9, e maior terá de ser a parede lateral que suporta a cobertura e esta força horizontal. Outro dos problemas é a flexão das *pernas*, e a primeira forma de o resolver foi introduzir uma barra horizontal que liga as *pernas*

⁹ Tipo de samblagem entre duas peças de madeira, através do seu corte e sobreposição. Geralmente corta-se metade de cada uma das peças de forma a permitir o encaixe entre elas.

¹⁰ A união de *garganta e cornezuelo*, é uma característica única da carpintaria ibérica, associada à pré-fabricação de armações de telhados, tendo sido utilizada pelo menos entre os sécs. XIII e XVII.

sensivelmente a meio destas. Este elemento a que se daria o nome de *nível* ou *olivel* funciona essencialmente à compressão permitindo a diminuição dos esforços de flexão, reduzindo os efeitos das cargas da cobertura e ação do vento.

A introdução do *nível* origina a *asna de nível*, Figura 10, das mais utilizadas no final da Idade Média¹¹, em que o *nível* é colocado, maioritariamente, a dois terços da altura de cada conjunto de *perna* e *fileira*. Tal como já foi referido, este sistema dá uma maior estabilidade à asna.



Figura 10 – Cobertura de asnaria com asnas de nível – Igreja de São Francisco em Mogadouro, início do séc. XVII, reconstruída no séc. XX pela DGEMN – Fotografia IHRU (www.monumentos.pt)

Mais tarde, como forma de solucionar a força F_H , introduz-se pela primeira vez o conceito de tirante – peça resistente a esforços de tração, absorvendo completamente a força horizontal originada. Neste caso poderia adotar-se um tirante de madeira – *linha* - ou de ferro, consoante o vão e a disponibilidade de material. Esta solução permitiria reduzir as paredes de suporte da cobertura, uma vez que a *linha* absorveria a totalidade dos esforços horizontais produzidos pela cobertura.

Nascem então as primeiras treliças de madeira pela mão dos Romanos, coberturas autoportantes de seção triangular, com nós articulados que impedem o funcionamento dos elementos de barra à flexão através da introdução de cargas apenas nos nós, tendo por isso de resistir apenas a esforços axiais de compressão ou tração. Com a redução da resistência à flexão é possível reduzir a secção de madeira necessária, o que é muito importante no aproveitamento de material e principalmente por se poderem aproveitar árvores de tamanho inferior.

A partir daqui, e com o desenvolvimento de ferramentas para trabalhar a madeira, foi possível aumentar os vãos a vencer e aumentar também o número de soluções típicas a utilizar, sendo fator determinante a expansão do Império Romano e a proliferação, por toda a sua área de influência, deste tipo de coberturas, generalizando-se a partir daqui o seu emprego (Oliveira,

¹¹ Em Portugal, existem exemplares construídos entre o início do séc. XV e o final do séc. XIX.

2009). No entanto, com as invasões Bárbaras são introduzidas as estruturas de pernas¹² (J. S. Martins et al., 2013), provenientes da Europa Central, que substituem as antigas treliças romanas, passando estas a existir maioritariamente em Itália.

Até esta altura, o conhecimento era transmitido principalmente de forma oral por sábios e artesãos. Os tratados começam a aparecer nesta época, e no Renascimento surgem os primeiros, de arquitectura, que mencionam as estruturas de madeira (sobretudo coberturas) principalmente em Itália, sendo a maioria deles baseados na obra de Vitrúvio (Sánchez, 2006).

Alberti¹³ na sua obra *De Re Aedificatoria* publicada em 1485 depois da sua morte, é dos primeiros seguidores de Vitrúvio, e apesar de desenvolver a temáticas das coberturas de madeira refere que “a cobertura do templo deve ser abobadada”. Outro dos tratadistas de estruturas de madeira da época é Serlio¹⁴; com *I sette libri dell'architettura* refere que a inclinação da cobertura terá de estar de acordo com o país em que é construída, distinguindo o caso espanhol e italiano. Apresenta também um catálogo de edifícios com diversos tipos de asna de cobertura possíveis, Figura 11.

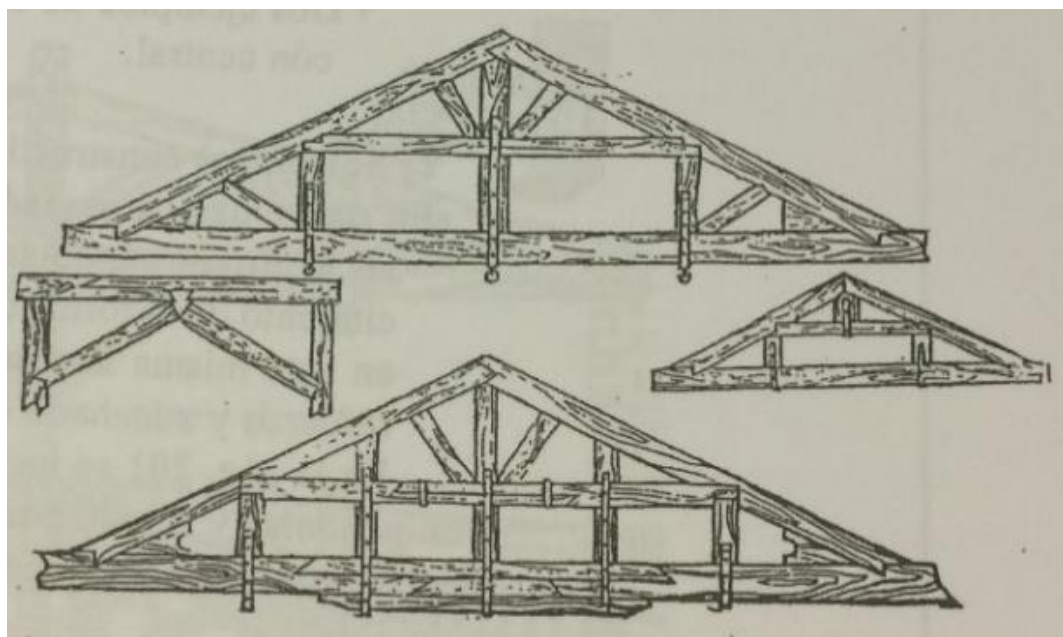


Figura 11 – Tipos de asnas pensados por Serlio (Sánchez, 2006)

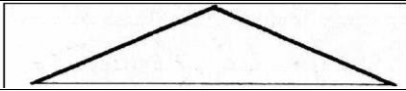
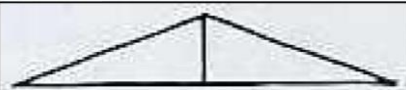
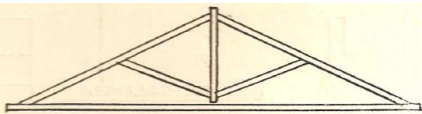




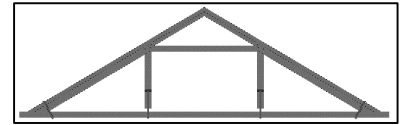
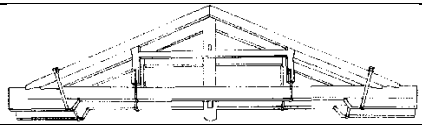
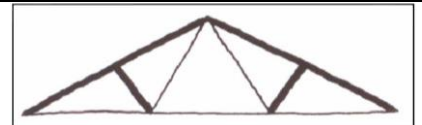
¹² Caracterizadas por serem estruturas sem madres, constituídas apenas por asnas na direção longitudinal

¹³ Arquiteto, historiador de arte e humanista italiano do séc. XV (1404-1472), constitui juntamente com Antonio Averlino e Francesco di Giorgio Martini o grupo de tratadistas Italianos da época (Sánchez, 2006).

¹⁴ Arquiteto italiano (1475-1554) seguidor dos princípios arquitetónicos de Vitrúvio.

Apresenta-se na Tabela 1 um resumo da evolução das asnas de cobertura e a sua principal característica.

Tabela 1 – Evolução das asnas de cobertura

Tipo de Asna	Imagem	Característica Principal
Triangular séc. VI		Duas pernas unidas por um tirante
de Pendural		O pendural permite suportar a flexão do tirante quando o vão a vencer é grande
Simples		Com o aumento do vão, aumenta o comprimento das pernas e consequente flexão das mesmas, o que se resolve com a introdução das escoras diagonais que funcionam sobretudo à compressão
Composta ou Inglesa		Similar à asna simples mas com um maior número de elementos, mas mais curtos, condizendo com a flora disponível em Inglaterra
Belga		Deixam de existir barras verticais, embora continuem a existir escoras à compressão, mas também se introduzem barras à tração - pendurais inclinados.
Alemã ou em Tesoura		Liberta espaço por baixo da asna através da inclinação da linha, dividindo-a em duas
Suíça		Introdução de tirante curvo ou diagonal, que também aumenta o espaço por baixo da asna, e mais um caso de pendurais inclinados
Palladiana séc. XVI		Asna com um nível e dois pendurais, que se justifica para diminuir a visibilidade do pendural central, no uso de coberturas "à vista"
Palladiana Dupla - séc. XVI		Asna utilizada maioritariamente em Itália, que permitia vencer vãos superiores a 14/15 metros (Valeriani, 2003)
Polanceau – séc. XVIII		Adaptação da asna belga, utilizada depois da Revolução Industrial o que implica, na maioria dos casos, o uso de aço em vez de madeira – uso de tirante de aço.

2.2.2. Asna Palladiana

Dentro das coberturas referidas destacam-se precisamente as *asnas palladianas* que, apesar de já existirem antes de Andrea Palladio¹⁵, devem o seu nome a este, devido à utilização intensiva que fez delas nas suas obras. São inicialmente desenhadas em Roma, e rapidamente se

¹⁵ Andrea Palladio, arquiteto italiano renascentista (1508-1580) deixou uma das obras mais importantes para a arquitetura moderna – *I Quattro Libri dell'Architettura* de 1570.

propagam por toda a Europa, chegando a Portugal ainda nesse século. Dos grandes laboratórios (Bettiol, 2010) da asna *palladiana* salienta-se o Arsenal de Veneza, local de construção e experimentação deste tipo de asna durante diversos séculos, o que permitiu a evolução de conhecimento relativo a este tipo de asna.

Estas coberturas são utilizadas em toda a Europa até à Época Moderna – século XIX – altura em que se começam a introduzir as ligações metálicas e tirantes de ferro – *asna de Polanceau*; no entanto, as asnas típicas de madeira continuam ainda hoje a ser utilizadas.

Através da observação da Tabela 1 nota-se que todas as asnas têm elementos em comum, não só os elementos principais que fazem parte da tal treliça triangular que serve de base a este tipo de construção, mas também elementos que integram a sobre-estrutura. Pegando no caso de estudo desta dissertação – asnas *palladianas* – vemos na Figura 12 quais são esses elementos, apresentando-se depois na Tabela 2 a sua principal função.

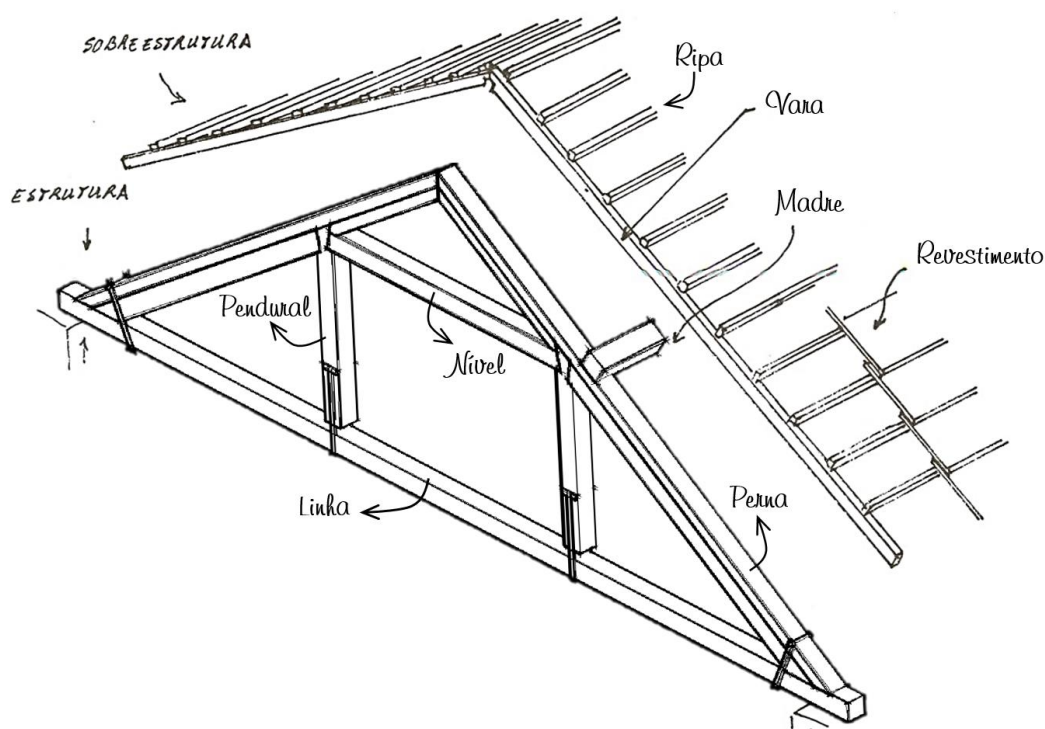


Figura 12 – Elementos constituintes da asna *palladiana* comum

Tabela 2 – Características dos elementos da asna *palladiana*

	Elemento	Características e Função Estrutural
Sobre estrutura	Ripas	Assentam sobre as varas, às quais transmitem a carga do revestimento (podem não existir)
	Varas	Recebem as cargas das ripas e transmitem-nas às madres
	Revestimento	Assenta sobre as ripas, contém normalmente um forro, guarda-pó e telha
Estrutura	Madres	Transmitem as cargas da sobre estrutura à estrutura em pontos estratégicos onde normalmente existem apoios ou ligações – conferem contraventamento à estrutura fazendo a ligação de asna a asna
	Pernas	Levam as cargas das madres aos apoios e linha, funcionam predominantemente à compressão
	Linha	Recebe as cargas das pernas e trabalha essencialmente à tração, evitando a abertura da asna
	Nível	Mantém a abertura da asna permitindo a utilização de dois pendurais.
	Pendural	Evita a flexão da linha caso seja necessário, embora este nunca toque na mesma
	Escoras	Utilizadas em asnas de grandes vãos, suportando a flexão da perna funcionando à compressão

Neste tipo de cobertura também os nós se apresentam como partes fundamentais, estabelecem a ligação dos elementos, e sendo pontos de transmissão de esforços necessitam de um cuidado de dimensionamento redobrado, apresentando-se também como os locais mais débeis da estrutura.

Para que um nó funcione corretamente é necessário que esteja em equilíbrio, isto é, que as forças nele presentes sejam transmitidas entre elementos, evitando a existência de momentos fletores que podem originar problemas de torsão. Outro dos problemas, neste caso próprio da madeira, é a direção da aplicação dos esforços, isto porque a resistência da madeira na direção perpendicular ao veio é muito inferior à da direção paralela ao veio, o que implica que os esforços no nó devam ser transmitidos através de secções perpendiculares ao veio da madeira, se possível em ambos os elementos; caso isso não seja possível, ambos devem ser afetados de igual forma.

Outra das singularidades das coberturas de madeira são as ligações entre elementos, podendo estes ser de três tipos – empalme, acoplamento e samblagem. Os empalmes destinam-se a prolongar longitudinalmente o elemento de barra, podendo transmitir esforços axiais ou de flexão, Figura 13.



Figura 13 – Tipos de empalmes – exemplos

Os acoplamentos são as uniões criadas para aumentar a secção do elemento, podendo ser feita por justaposição ou sobreposição, Figura 14. Esta ligação tem o objetivo de aumentar a inércia da secção, quer por esta estar danificada ou mesmo com o intuito de aumentar a sua capacidade resistente.

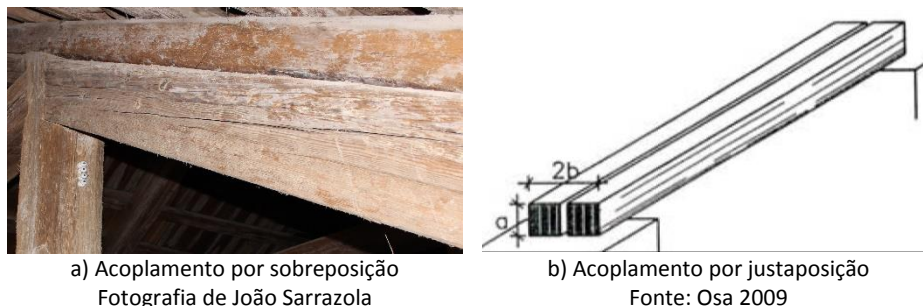


Figura 14 – Tipos de acoplamentos - exemplos

Por último, temos o encontro de duas ou mais barras por samblagem, Figura 15, com um determinado ângulo, que também pode ser em cruz quando ambas as barras têm continuidade.

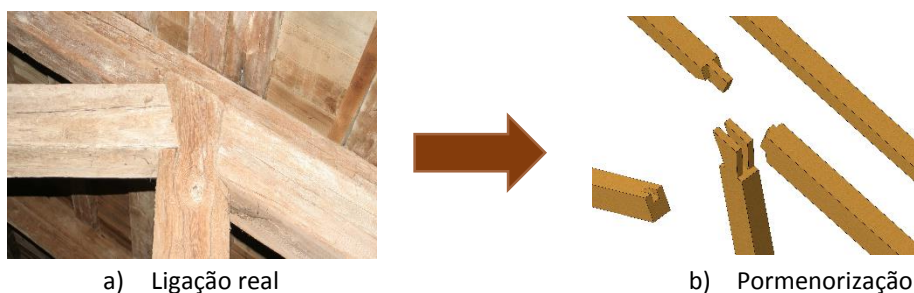


Figura 15 – Exemplo de samblagem entre quatro elementos – Fotografia e desenho de João Sarrazola

Outra das ligações com maior importância neste tipo de coberturas é a ligação entre a *linha* e *perna*, uma vez que se trata do ponto da estrutura que concentra maiores esforços, sendo na maioria dos casos (incluindo os casos de estudo) reforçada com um estribo metálico, evitando a abertura entre ambos os elementos. Esta ligação transmite esforços de compressão da perna para a linha, Figura 16, trabalhando esta à tração, evitando a abertura da asna. É também neste ponto que é equilibrada a carga vertical, através de um apoio que pode ser por exemplo um cachorro de cantaria, mas na maioria dos edifícios são as próprias paredes de alvenaria.

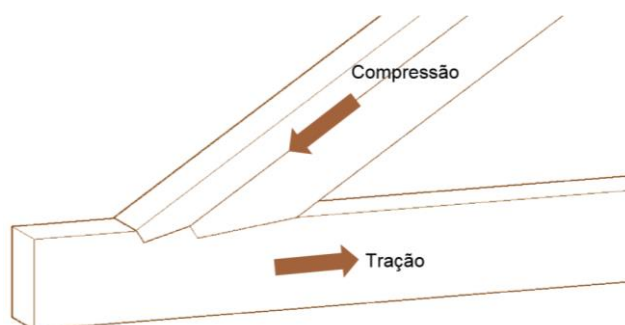


Figura 16 – Pormenor da ligação da *perna* à *linha*

2.2.3. Evolução do Cálculo e Regras de Dimensionamento

Se a construção de coberturas para abrigo com troncos, ou mesmo ramos de árvores de fácil acesso, remonta aos tempos do homem primitivo, as primeiras regras de construção de asnas de madeira também não aparecem apenas em tempos avançados, uma vez que já Vitruvius no século I a.C. escrevia na sua obra *De Architectura* – Livro X, que o uso de certos elementos de madeira como escoras já dependeria do vão (Vitruvius, 1914). Isto significa que existia já nessa altura uma ideia e conhecimento bem definido de como deveria ser a estrutura, que elementos deveria conter e a que aspetos deveria obedecer para que fosse corretamente construída – é transmitida assim a primeira noção de dimensionamento de uma estrutura de cobertura de madeira.

Na Antiguidade, em que o conhecimento era transmitido através de tratados, muitos daqueles que estão relacionados com a arquitetura e construção davam grande importância à aritmética e geometria, tratando-os como os principais componentes da arquitetura (Pérez, 2003). Era também por estas duas ciências que passavam as primeiras formas de dimensionamento de asnas de cobertura, pois era através delas que se estabeleciam proporções que permitissem determinar o melhor tipo de asna, determinando-se depois a inclinação e os materiais a utilizar. É o caso de Fray Lorenzo de San Nicolás¹⁶, que na primeira parte da sua publicação *Arte y Uso de la Architectura* aborda o traçado e dimensionamento de coberturas de madeira, adotando o método representado na Figura 17.

Tal como está representado na Figura 17, o vão corresponde ao comprimento AB – diâmetro da circunferência; liga-se o ponto B a um dos pontos da corda (N, Q, X, O, L ou R – consoante o número de elementos que se deseje ter na asna) e desse até A, este último cateto interseeta a bissetriz de AB – reta YS, e onde se dá essa interseção corresponde à altura da asna.

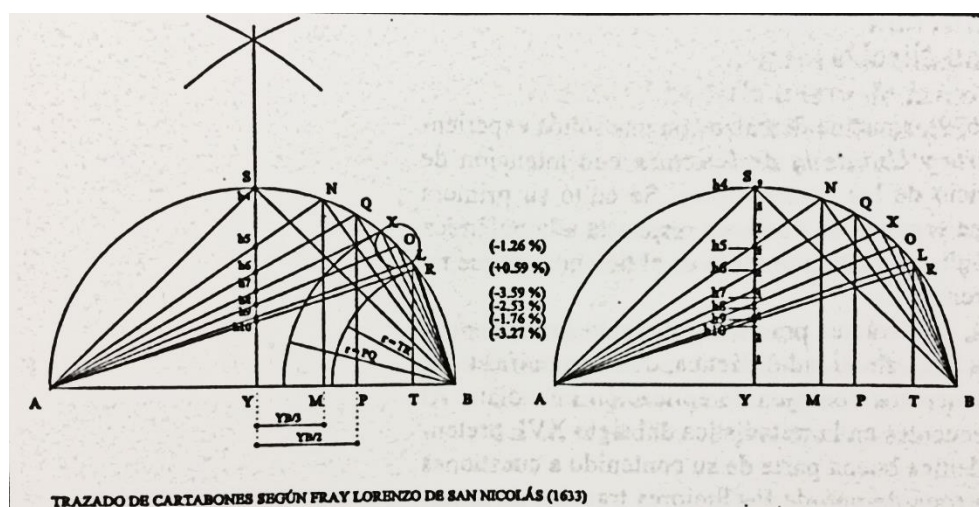


Figura 17 – Método de traçado de coberturas de San Nicolás (Sánchez, 2006)

¹⁶ Arquiteto espanhol (1595-1679) e experiente mestre-de-obras.

Posteriormente, quando existiam já diversas obras no campo das coberturas, começaram a desenvolver-se métodos empíricos de cálculo e dimensionamento. O cálculo da estrutura deve ser feito convenientemente de forma a que esta suporte toda a carga a que é solicitada, seja peso próprio, sobrecargas ou ações do vento, por exemplo. Antigamente o cálculo ou projeto das asnas de madeira era efetuado essencialmente por regras simples e tabelas, na maioria dos casos em função do vão, tendo em conta também o afastamento entre asnas, e eram elaboradas por mestres carpinteiros sábios e experientes. Mostra-se um exemplo de uma tabela de cálculo da *Asna Simples* da Enciclopédia de Construção Civil Portuguesa de 1955, Tabela 3.

Tabela 3 – Regras de dimensionamento de asnas simples, em cm (Costa, 1955)

Vãos	Linhas	Pernas	Escoras	Pendurais	Madres	Varas
5.00	12 × 10	12 × 10	10 × 10	10 × 10	16 × 10	6 × 4
6.00	14 × 10	16 × 10	12 × 10	10 × 10	18 × 10	6 × 4
7.00	14 × 12	16 × 12	12 × 12	12 × 12	18 × 10	8 × 6
8.00	16 × 12	20 × 12	12 × 12	12 × 12	20 × 10	8 × 6

Quanto à inclinação a considerar, *Palladio* na sua obra *Os Quatro Livros de Arquitetura*, sugeria que se dividisse a linha em nove partes iguais, e a altura corresponderia a duas dessas partes (Palladio, 1570), o que fazia com que a cobertura fosse pouco inclinada, o que levou Scamozzi a lembrar Vitruvius, e em 1615 a adotar que a altura da asna seria equivalente a um quarto ou um quinto do comprimento desta. Em 1694, Fontana sugere que a inclinação da asna se encontre entre 19° e 23°, dependendo do vão, das condições de exposição da cobertura a ações do vento, neve e chuva bem como à posição de telhados vizinhos (Valeriani, 2003).

Na verdade, a inclinação da asna depende de variados fatores que influenciam diretamente a opção a adotar, tal como está patente no *Tratado de Carpintaria Antiga e Moderna* de Scala, 1895, e são eles o tipo de madeira da cobertura, uma vez que nem todas as madeiras se conseguem trabalhar da mesma forma – o ideal seria ter elementos contínuos. Outro dos fatores é o local da construção, uma vez que o ambiente difere, tal como as condições climáticas, períodos de chuva, e humidade. Por último, e dos mais importantes é a prática do carpinteiro construtor, tal como a observação de como são as restantes coberturas do meio envolvente.

Em Portugal, a abertura normalmente considerada na asna entre a *linha* e a *perna* está entre 26° a 34° (Costa, 1955), uma vez que é esta a inclinação comum nos telhados portugueses tendo em conta o nosso tipo de clima. A partir destes dados, os mestres carpinteiros faziam o traçado rigoroso da estrutura e procediam à sua construção.

Hoje em dia são utilizadas normas e regulamentos que definem não só o dimensionamento de estruturas de madeira através do Eurocódigo 5, mas também classes de resistência e qualidade. Este tipo de documentos em vigor na União Europeia visa unificar critérios e normas de cálculo e dimensionamento de estruturas de engenharia civil.

3. Verificação da Segurança Estrutural em Coberturas de Madeira

A conceção de estruturas de coberturas de madeira requer o cumprimento das normas e regulamentos atuais, salvaguardando o correto funcionamento estrutural e a estabilidade pretendida assim como um bom comportamento no dia-a-dia. Assim, importa fazer uma verificação da estabilidade em cada elemento da estrutura e avaliar se o dimensionamento realizado outrora, está de acordo com as mais recentes práticas regulamentadas.

Utilizam-se os regulamentos e as normas elaborados por um Comité Europeu de Normalização (CEN), que visam a generalização no projeto de estruturas a nível europeu.

Assim, para a verificação da segurança estrutural de asnas de madeira, considera-se a seguinte regulamentação:

- EN 1990-1-1-2002, Eurocódigo 0 Parte 1-1 – Bases para o Dimensionamento;
- EN 1991-1-2003, Eurocódigo 1 Parte 1-1 – Acções;
- EN 1991-1-4-2005, Eurocódigo 1 Parte 1-4 – Acção do Vento;
- EN 1995-1-1-2004, Eurocódigo 5 Parte 1-1 – Dimensionamento de Estruturas de Madeira.

Este último Eurocódigo, respeitante integralmente às estruturas de madeira, foi a norma mais relevante para a realização deste trabalho. O Eurocódigo 5, parte 1-1 divide-se, principalmente, em três partes. A primeira, serve de base ao dimensionamento das estruturas através da introdução aos princípios gerais a utilizar na verificação da estabilidade. A segunda, diz respeito a regras de cálculo para elementos e sistemas estruturais, bem como para cálculo de esforços simples e combinados. As verificações aos estados limite último e de serviço são também descritas nesta segunda parte. Por último, o Eurocódigo 5 parte 1-1, aborda também as ligações deste tipo de estruturas e esta abordagem pode considerar-se uma terceira parte.

De uma forma resumida (Figura 18) as verificações estruturais que garantem, não só, a estabilidade da estrutura, mas também, a limitação e controlo de danos, iniciam-se com a avaliação dos dados relativos aos materiais e com a quantificação das ações na estrutura. Com estas, formam-se combinações de ações e obtêm-se os esforços nos elementos, seguindo o modelo de cálculo específico para a estrutura em análise (recorrendo depois ao programa de cálculo automático SAP 2000®), que analisa e calcula a distribuição dos esforços por elemento, através de uma análise linear.



Figura 18 – Modelo de cálculo de estruturas de madeira (Negrão & Faria, 2009)

Ao longo do processo mencionado, as principais dificuldades prendem-se com a obtenção dos valores de cálculo dos materiais e em escolher o modelo de elementos finitos que represente adequadamente cada um dos casos (Negrão & Faria, 2009)

3.1. Bases para o Cálculo de Ações

A conceção de estruturas de madeira deve considerar o facto de este ser um material orgânico, com fenómenos de degradação particulares, com origem, por exemplo, em fungos ou insetos. Assim, é necessário definir e classificar a estrutura segundo a classe de duração das ações e classe de serviço, de forma a garantir uma correta análise da mesma.

- Classe de duração das ações – O Eurocódigo 5, parte 1-1 (2.3.1.2) (CEN, 2006) regula o tempo a que uma estrutura se encontra sujeita a determinada ação. Na Tabela 4 encontram-se expressas as ações a considerar, bem como a classe de duração correspondente a cada uma delas.

Tabela 4 – Classes de duração das ações

Classe de duração da ação	Tipo de ação em análise
Permanente	Cargas permanentes
Média duração	Sobrecarga na cobertura
Curta duração	Vento

- Classe de Serviço – O Eurocódigo 5, parte 1-1 (2.3.1.3(2)) (CEN, 2006) caracteriza a estrutura em virtude de dois fatores: temperatura e humidade relativa do ambiente de construção. Adotou-se em todos os casos de estudo a seguinte classe de serviço:

Classe de serviço 1: caracterizada por um teor de água dos materiais correspondente ao teor de água de equilíbrio para um ambiente com uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa do ar ambiente, excedendo 65% somente durante algumas semanas do ano.

- Dimensionamento pelo método dos coeficientes parciais

De acordo com o método dos coeficientes globais, o valor característico de uma propriedade mecânica (Tabela 5 e Tabela 6) deve ser afetado de um coeficiente parcial, γ_m , que tem em conta a natureza do material, e de um fator k_{mod} que engloba a classe de serviço e a duração da ação¹, Tabela 7.

Tabela 5 – Coeficientes parciais de segurança

Coeficientes	Valor
Ações permanentes - γ_g	1.35
Ações variáveis - γ_q	1.5
Madeira maciça - γ_m	1.3

Tabela 6 – Coeficientes ψ para edifícios – EC0 – Quadro A1.1

Ação	ψ_0	ψ_1	ψ_2
SC - Categoria H	0	0	0
Vento	0.6	0.2	0

Tabela 7 – Valores de k_{mod}

	Classe de duração da ação		
	Permanente	Média Duração	Curta Duração
k_{mod}	0.6	0.8	0.9

O valor de cálculo de uma propriedade mecânica X é dado por,

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (1)$$

onde,

X_k – valor característico da propriedade em análise

γ_m – coeficiente parcial de segurança correspondente ao material em análise

- Ações a considerar

São as ações nas estruturas que provocam os esforços e deformações nos elementos. Para as verificações de segurança de estruturas há que considerar as seguintes ações:

- Cargas permanentes – G

Nas cargas permanentes (G) incluem-se o peso próprio dos elementos, p_p , e as restantes cargas permanentes (RCP). O peso próprio depende da dimensão dos elementos que constituem a asna

¹O valor de k_{mod} é adotado de acordo com a duração mais condicionante que esteja presente na combinação de ações.

e da densidade da madeira utilizada, enquanto a restante carga permanente (Tabela 8) corresponde ao peso próprio de materiais de revestimento e outros. Em geral trata-se do conjunto telhas, forro e ripado, pelo pavimento e teto, quando a asna suporta o teto em madeira como são os casos das coberturas da Igreja de S. Roque e da Sé Catedral de Santarém.

Tabela 8 – Restante carga permanente na cobertura segundo as Tabelas Técnicas (Reis et al, 2005)

RCP	Carga	[kN/m ²]
Cobertura	Telha, forro e ripado	1.45
Pavimento	Forro em madeira	0.5
Teto	Forro de teto em madeira e gesso	0.6

○ Sobrecarga – Q_1

De acordo com o Eurocódigo 1 parte 1-1 (CEN, 2009), admitindo que se trata de cobertura não acessível, exceto para operações de manutenção e reparação, o valor de sobrecarga a adotar é o que se indica na Tabela 9.

Tabela 9 – Sobrecarga de cobertura a considerar segundo o Eurocódigo 1

SC	[kN/m ²]
EC1 - Coberturas não acessíveis, exceto manutenção	0.4

Relativamente à sobrecarga no pavimento e teto suportado pela asna de cobertura, o Eurocódigo 1 parte 1-1, indica a adoção de um valor igual às da sobrecarga tipo de um edifício de habitação. No entanto, uma vez que este é um espaço reservado, sem acesso com exceção de operações de manutenção e reparação, adotou-se o valor de sobrecarga indicado na Tabela 9.

○ Vento – Q_2

Segundo o Eurocódigo 1 parte 1-4 (CEN, 2010a) a ação do vento, que por vezes é condicionante neste tipo de estrutura, pode ser quantificada através da pressão w , obtida por,

$w = w_i + w_e$, sendo w_i a pressão interior e w_e a pressão exterior

→ $w_i = c_{pi} \times q_p(z_i)$, em que c_{pi} é o coeficiente de pressão, q_p a pressão dinâmica de pico e z_i a altura de referência da cobertura

- c_{pi} – EC1-1-4 - 7.2.9(6) - Nota 2

Sucção

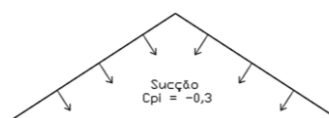


Figura 19 – c_{pi} de sucção

Pressão



Figura 20 – C_{pi} de pressão

- $q_p = c_e(z) \times q_b$, em que $c_e(z)$ é designado por coeficiente de exposição, e q_b por pressão dinâmica do vento

✓ $q_b = 0,5 \times \rho \times V_b^2$, onde ρ é a massa volúmica do ar e tem o valor de 1,25 kg/m³ e V_b a velocidade média do vento

- $V_b = C_{dir} \times C_{season} \times V_{b,0}$, em que os coeficientes de direção, C_{dir} e sazão, C_{season} têm o valor de 1, e $V_{b,0}$ significa o valor característico da velocidade média

- $V_{b,0}$ depende da zona do território, dividido em zonas A e B, com valores de 27 m/s e 30 m/s respetivamente

✓ c_e – valor retirado de um gráfico de que depende,

- Categoria de terreno – Zonas I a IV
- Altura do edifício

→ $W_e = C_{pe} \times q_p(Z_e)$

- c_{pe} tem em conta a inclinação da asna e o número de vertentes. O Eurocódigo 1 parte 1-4 fornece dois valores de pressão para cada uma de 4 zonas da cobertura, Figura 21,

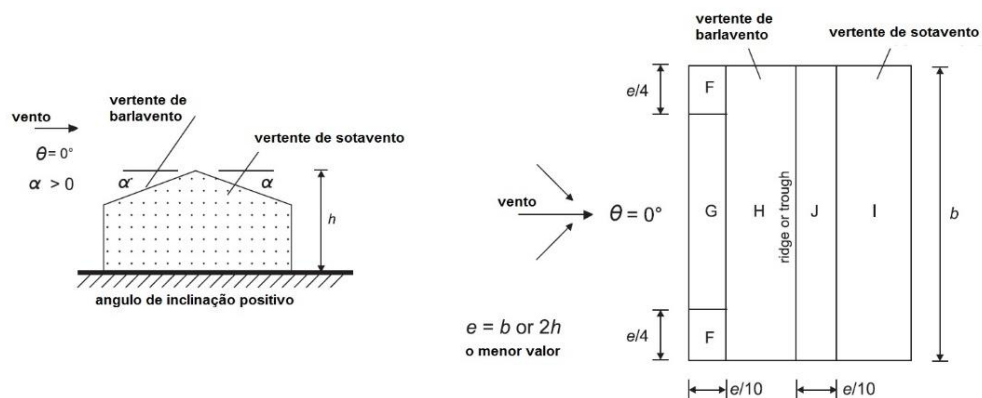


Figura 21 – Zonas em coberturas de duas vertentes

E é utilizada a seguinte convenção de sinais, Figura 22,

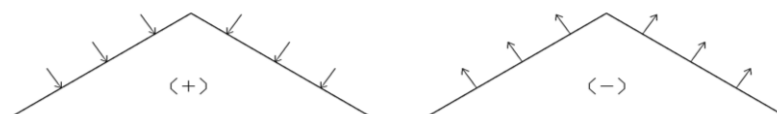


Figura 22 – Convenção de sinais para a pressão exterior

Nos casos em estudo, e tendo todos eles uma altura aproximada de 15 metros, a pressão w , toma os valores indicados na Figura 23, em que não é ilustrado o sentido da pressão exercida pelo vento, uma vez que este pode variar consoante a combinação $w_e + w_i$ em análise.

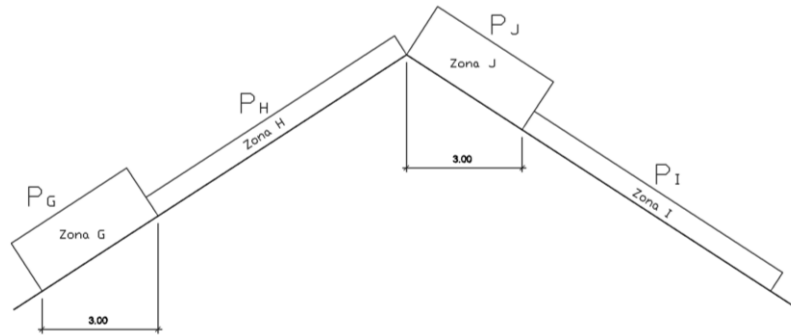


Figura 23 – Esquema final de pressão na cobertura

- Combinações de ações a considerar para a verificação de segurança

Norma	Combinação	Expressão
<i>Estado Limite Último</i>		
EC0 - 6.4.3.2(3)	Fundamental	$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{g,j} G_{k,j} + \gamma_{q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{q,i} \varphi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2)$
<i>Estado Limite Serviço</i>		
EC0 - 6.5.3(2) a)	Característica	$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \varphi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3)$

Para as combinações apresentadas as ações variáveis são a sobrecarga na cobertura (Q_1), e a ação do vento (Q_2)³. Para ambos os casos, será considerada como ação variável base aquela que conduzir à situação mais desfavorável.

De acordo com o descrito e tendo em conta a Tabela 5 e a Tabela 6, consideraram-se as seguintes combinações de ações:

ELU	Combinação [1]	$E_d = 1,35 (p_p + RCP) + 1,5 * Q_1 + 1,5 * 0,6 * Q_2$
	Combinação [2]	$E_d = 1,35 (p_p + RCP) + 1,5 * Q_2$
ELS	Combinação [3]	$E_d = (p_p + RCP) + Q_1 + 0,6 * Q_2$
	Combinação [4]	$E_d = (p_p + RCP) + 0,6 * Q_2$

³ Apenas se consideram as ações variáveis sobrecarga e vento uma vez que são as mais condicionantes tendo em conta o tipo de estrutura e localização.

3.2. Verificações de segurança segundo o Eurocódigo 5

A definição do modelo estrutural a adotar é umas das dificuldades na concepção de estruturas de madeira, pois estas apresentam um comportamento mecânico anisotrópico. Tendo em conta que as células de celuloso estão alinhadas no sentido do fio da madeira e a lenhina assegura no sentido transversal a ligação entre as fibras de celulose, deve considerar-se para a madeira duas direções de diferente comportamento – direção do fio e direção perpendicular ao fio (Negrão & Faria, 2009).

Assim, o sentido e forma de posicionamento da madeira na estrutura tem grande relevância na determinação da sua estabilidade, uma vez que a resistência na direção perpendicular ao fio é bastante inferior à da resistência na direção do fio. Como nas estruturas correntes as cargas atuantes apenas solicitam os elementos na direção do veio, apenas se teve em conta este tipo de verificação.

De acordo com o Eurocódigo 5 parte 1-1, para verificar a segurança de uma estrutura de madeira é necessário realizar dois grupos de verificações. O primeiro tem em vista problemas de segurança estrutural (estado limite último) e o segundo avalia a adequabilidade da estrutura à utilização diária (estado limite de serviço).

3.2.1. Estado Limite Último

O estado limite último está relacionado com a perda de estabilidade da estrutura, ou dos seus elementos, e o Eurocódigo 5 sugere uma análise elástica linear de primeira ordem, onde a distribuição de forças internas não seja afetada pela distribuição de rigidez na estrutura, devendo ser utilizados valores médios de rigidez (uma vez que se trata de asnas construídas com material uniforme).

De acordo com o Eurocódigo 5 parte 1-1, devem ser executadas as seguintes verificações:

- [1] Verificação da segurança à tração paralela ao fio

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (4)$$

em que:

$\sigma_{t,0,d}$ é o valor de cálculo da tensão de tração atuante paralela ao fio;

$f_{t,0,d}$ é o valor de cálculo da resistência à tração paralela ao fio.

- [2] Verificação da Segurança à compressão paralela ao fio

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (5)$$

em que:

$\sigma_{c,0,d}$ é o valor de cálculo da tensão de compressão atuante paralela ao fio;

$f_{c,0,d}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão paralela ao fio.

- [3] Verificação da segurança à flexão

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (6)$$

em que:

$\sigma_{m,d}$ é o valor de cálculo da tensão atuante à flexão;

$f_{m,d}$ é o valor de cálculo da tensão resistente à flexão.

- [4] Verificação da segurança ao corte

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (7)$$

Em que:

τ_d é a tensão tangencial de cálculo;

$f_{v,d}$ é o valor de cálculo da tensão resistente ao corte.

Neste caso, de acordo com a Emenda EN1995-1-1:2007/A1, deve ser considerado um fator de redução da largura da secção de madeira, o que significa afetar a resistência da secção ao corte para ter em conta o efeito das fendas. Este fator k_{cr} para madeira maciça tem o valor de 0,67.

- [5] Verificação da segurança através da combinação de flexão e tração

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (8)$$

- [6] Verificação da segurança através da combinação de flexão e compressão

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (9)$$

- [6.1] Estabilidade à encurvadura de colunas

Esta última verificação deve ser efetuada quando o elemento estiver sujeito predominantemente à compressão, mas também sujeito a esforços de flexão. Para tal, deve começar-se por calcular a esbelteza do elemento em análise,

$$\lambda_j = \frac{L_{cr}}{i_j} \quad (10)$$

Em que a esbelteza λ_j depende de:

L_{cr} – comprimento de encurvadura do elemento;

i_j – raio de giração da secção transversal do elemento segundo o eixo j.

$$\lambda_{rel,i} = \frac{\lambda_i}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (11)$$

onde a esbelteza normalizada $\lambda_{rel,i}$ depende do valor característico da tensão resistente de compressão $f_{c,0,k}$ e de $E_{0,05}$ que representa o valor do Módulo de Elasticidade correspondente a 95% da amostra.

Os valores de $\lambda_{rel,i}$ devem ser inferiores a 0,3 e deve ser cumprida a expressão (9) – ou terá de ser satisfeita a seguinte expressão:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (12)$$

onde o fator de redução $k_{c,y}$ se obtém através de:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 + \lambda_{rel,y}^2}} \quad (13)$$

sendo,

$$k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad (14)$$

Em que β_c tem o valor de 0,2 para madeira maciça (Eurocódigo 5 parte 1-1 – expressão 6.29)

3.2.2. Estado Limite de Serviço

A verificação dos Estados Limite de Serviço, pretende garantir as condições de utilização da estrutura e é, normalmente, condicionada pela deformação ou pela vibração da estrutura. Neste estudo apenas será verificada a deformação da estrutura, uma vez que se tem como objetivo uma análise plana da asna de cobertura.

A deformação foi calculada tendo em conta os valores médios de resistência da madeira, onde w_{inst} é a parcela relativa à deformação instantânea calculada para a combinação de ações característica, que somada à deformação devido à fluência w_{creep} , (calculada com recurso ao fator k_{def}) permite obter a deformação final, w_{fin} . No caso de estruturas antigas não há registos da utilização de contra flecha, o que simplifica a verificação (Figura 24), resultando:

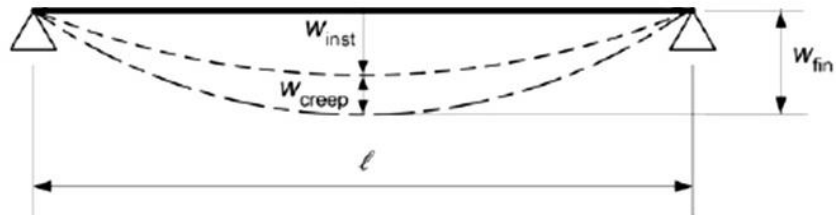


Figura 24 – Componentes da deformação – Adaptado da fig. 7.1 do EC5-1.1

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + \sum_{i \geq 1} w_{fin,Q_i} \quad (16)$$

onde,

para uma ação permanente G,

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) \quad (17)$$

para a ação variável base Q_j,

$$w_{fin,Q_j} = w_{inst,Q_j}(1 + \varphi_{2,j} k_{def}) \quad (18)$$

para a ação variável secundária Q_i,

$$w_{fin,Q_i} = w_{inst,Q_i}(\varphi_{0,i} + \varphi_{2,i} k_{def}) \quad (19)$$

O valor de k_{def} tem em conta o tipo de material utilizado e a classe de serviço da estrutura. Da tabela 3.2 do Eurocódigo 5 parte 1-1 tem-se o valor de 0.6, para a classe de serviço 1.

Os valores das deformações obtidos devem, portanto, estar limitados pelos valores apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores-limite de deformação para vigas segundo o EC5

	Simplemente apoiado
w_{inst}	L/300 a L/500
w_{fin}	L/150 a L/300

3.3. Modelo de Elementos Finitos

Para obter os esforços e as deformações que possibilitam efetuar as necessárias verificações de segurança, é habitual recorrer-se a programas de cálculo automático. Nos três *Casos de Estudo* que se apresentam no capítulo seguinte utilizou-se o programa de cálculo SAP 2000® v14.2. Este é um programa de elementos finitos que permite a modelação de estruturas e a avaliação dos esforços nos seus elementos, em função das ações, das características mecânicas dos materiais e das características geométricas das secções.

Começam por definir-se os materiais das estruturas de cobertura em estudo, neste caso os tipos de madeira e respetivas propriedades, Figura 25. Depois, definem-se as características geométricas dos elementos (Figura 26 e Figura 27).

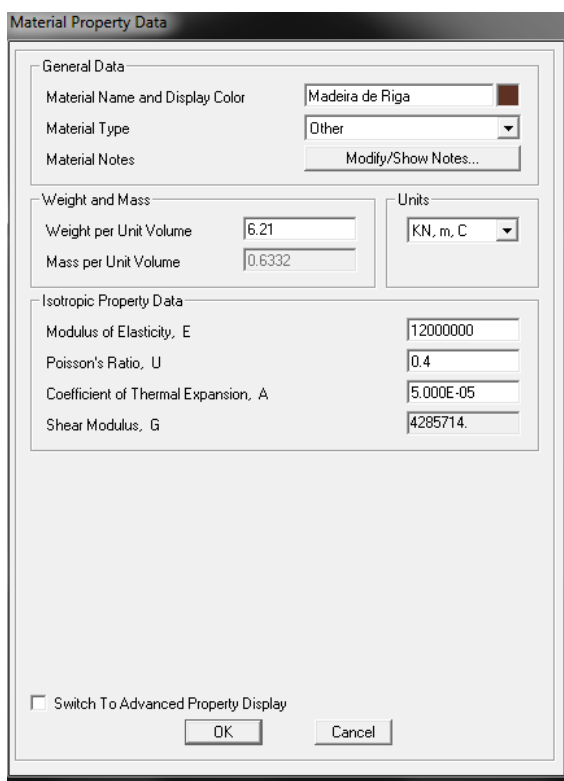


Figura 25 – Definição dos materiais

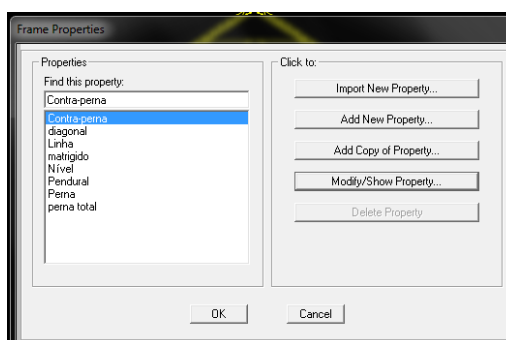


Figura 26 – Introdução dos elementos

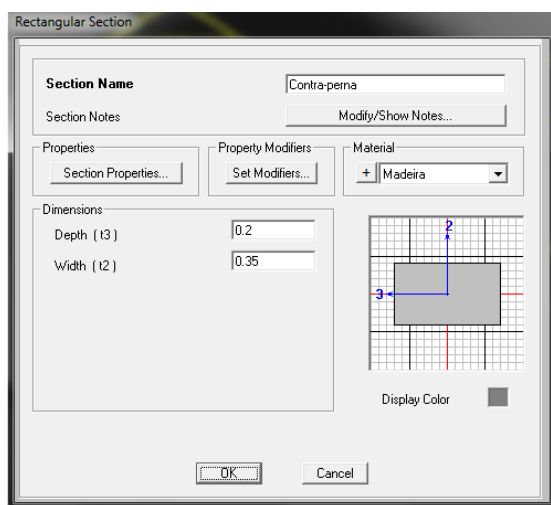


Figura 27 – Inserção das características de cada elemento

Posto isto, segue-se a construção do modelo numérico com elementos 2D, em que a asna é essencialmente uma estrutura treliçada, com nós de ligação entre elementos rotulados. As paredes dos edifícios que suportam as asnas, são simuladas por apoios simples e a ligação do *pendural* à *linha*, que na realidade é feita através de elementos metálicos (pé de galinha), é simulada modelando-se a *linha* como um elemento contínuo ligada ao *pendural* por uma rótula.

Em certos casos as asnas podem ser compostas, como nos casos de estudo da Igreja de S. Roque e da Sé Catedral de Santarém, isto é, podem ser constituídas por *perna* e *contraperna*. Este problema levanta algumas dificuldades na modelação destes dois elementos, sendo necessário recorrer a hipóteses na definição do modelo⁶. Nos casos em que as asnas são compostas, com *perna* e *contraperna*, introduziram-se estes elementos de forma separada (Figura 28). Assim a *contraperna* funciona por cima da *perna*, como um elemento contínuo desde

⁶ Utiliza-se como modelo a asna da Igreja de S. Roque.

a *linha*, até à cumeeira. A *perna*, funciona como um elemento descontínuo constituído por dois elementos, um da *linha* até ao *nível* e, outro desde o *nível* até à cumeeira.

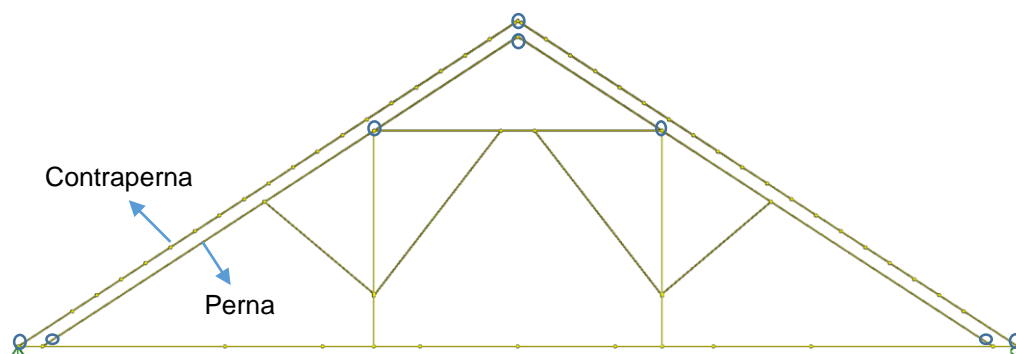


Figura 28 – Hipótese de modelação 1

No entanto, esta hipótese de modelação (hipótese 1) não é a melhor solução, pois não há compatibilidade da deformação dos elementos. Na verdade, como seria de esperar, a deformada da *contraperna* é superior à da *perna* (Figura 29), o que viola as condições de fronteira entre os dois elementos.

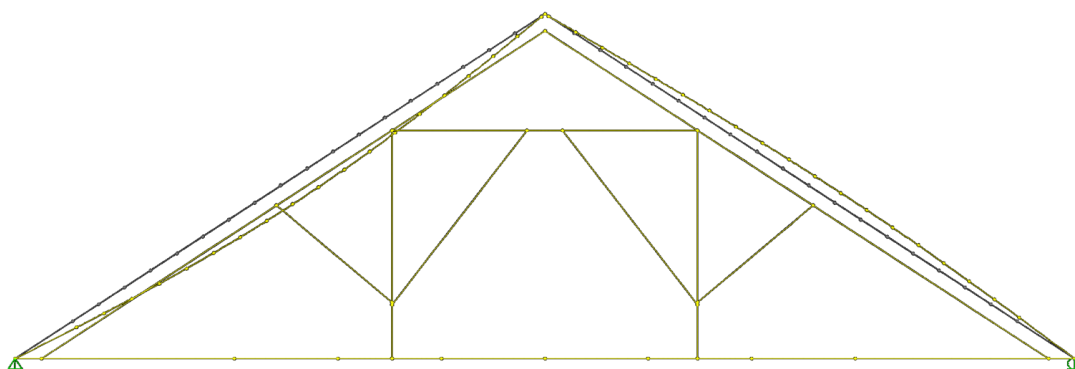


Figura 29 – Deformada do modelo da hipótese 1

Uma forma de evitar essa incompatibilidade é transformar a estrutura num modelo mais simples, transformando os elementos, *perna* e *contraperna*, num só elemento - “perna total”, Figura 30.

Esta hipótese de modelação (hipótese 2) apresenta melhores resultados do ponto de vista da compatibilidade das deformações face ao anterior, mas levanta outras desvantagens, pois não simula o real comportamento da *contraperna*. Na realidade a *contraperna* é um elemento contínuo, e só a *perna* é que é descontínua, apoiando-se (através de uma articulação) no *nível* e no *pendural*. No modelo computacional, Figura 30, a “perna total” que simula a *perna* e a *contraperna*, é descontínua, apoiando-se através duma articulação no *nível* e no *pendural*. Por outro lado, da variação da posição linha média da “perna total” resulta uma ligeira variação do vão do modelo numérico.

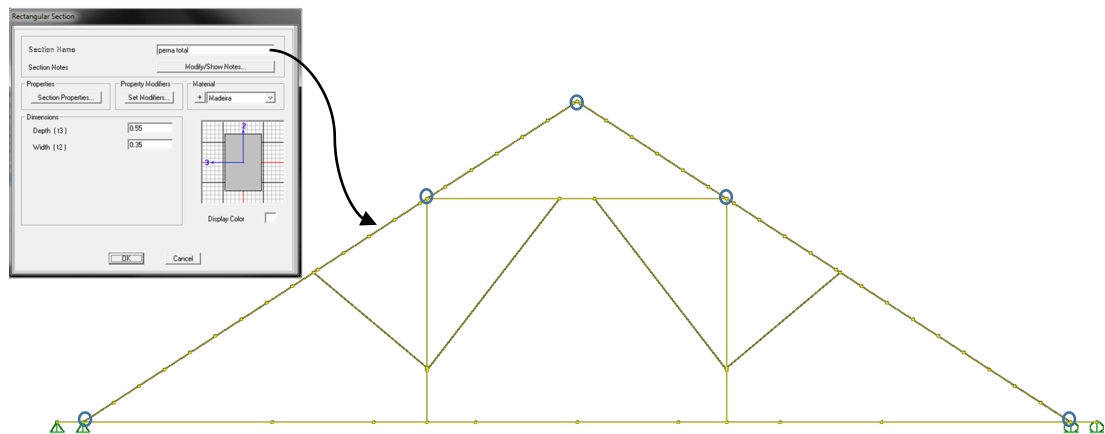


Figura 30 – Hipótese de modelação 2

Numa outra hipótese (hipótese 3) podem introduzir-se elementos de ligação entre a *contraperna* e a *perna*, como fazem Bamonte *et al.* (2001), no artigo *Construction of structural schemes for ancient timber structures*, onde estes elementos compatibilizam os deslocamentos entre estes dois elementos, atuando como barras rotuladas que apenas transmitem esforços axiais entre ambos, Figura 31.

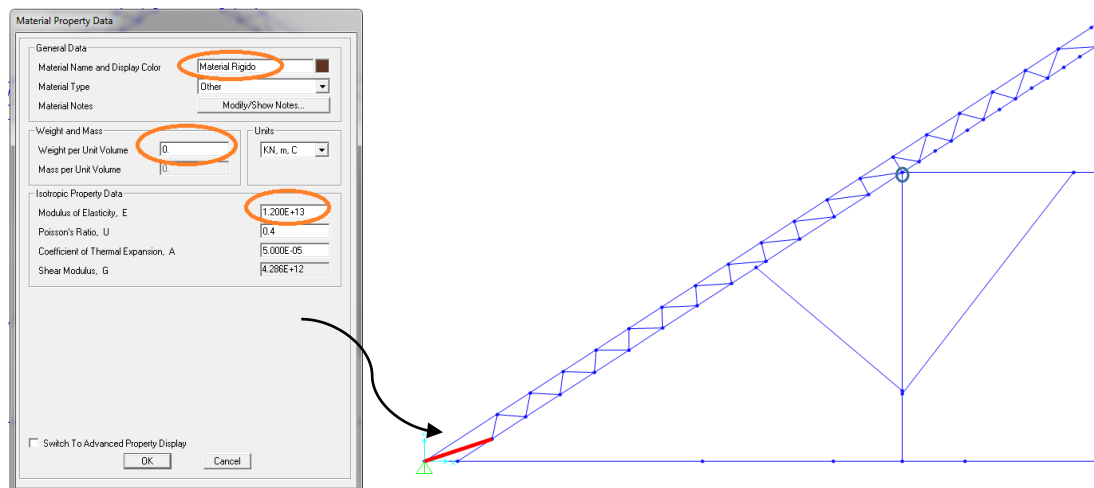


Figura 31 – Hipótese de modelação 3

No modelo correspondente à hipótese 3, introduziu-se um novo material, sem preso próprio, com uma rigidez muito superior à da madeira, para que este não seja sujeito a deformações e permita compatibilizar o deslocamento entre a *contraperna* e a *perna* (Figura 32).

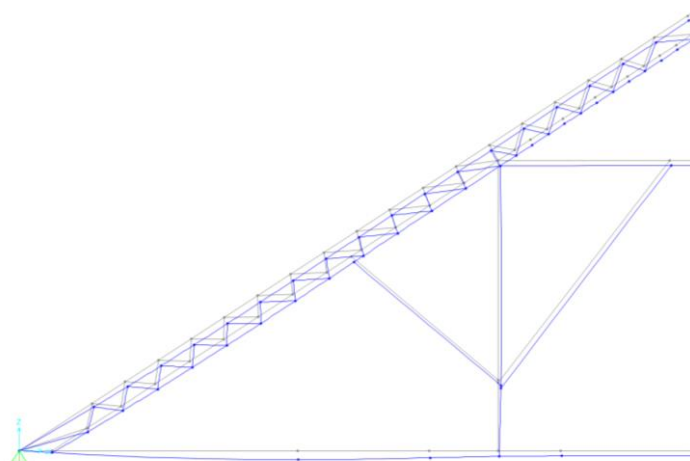


Figura 32 – Deslocamentos do modelo 3

Com este modelo é possível simular de uma forma bastante mais aproximada o que acontece na realidade ao nível de deslocamentos, esforços axiais e de flexão. No caso da flexão, verifica-se no modelo, que praticamente não existe na *contraperna*, o que está de acordo com a realidade uma vez que este elemento está continuamente apoiado na *perna*. No que respeita aos esforços axiais, os elementos da *perna* e *contraperna* trabalham à compressão e repartem entre si o esforço global de compressão, tal como acontece na realidade.

Embora não seja possível afirmar com total certeza, a ligação considerada no modelo entre a *perna* e a *contraperna* era habitualmente realizada na realidade por *cravos*⁷ (Figura 33), o que introduz uma outra verificação de segurança relacionada com a intensidade do esforço de corte a ser transmitida pelos cravos.



Figura 33 – Cravos utilizados neste tipo de estrutura

A verificação ao corte é feita através da seguinte expressão, descrita no quadro 3.4 do Eurocódigo 3 - parte 1-8 (CEN, 2010b),

$$F_{Ved} \leq F_{Vrd} \quad (20)$$

$$F_{Ved} \leq \frac{0.6 f_{ub} A}{1.25}$$

⁷ Peças em ferro, com tamanho superior ao prego convencional, utilizadas na antiguidade para ligar elementos da asna

onde,

A – Área da secção transversal do cravo;

f_{ub} – Tensão de rotura à tração do cravo.

Admitindo-se que os cravos adotados têm um diâmetro de 2 cm, e que o ferro tem uma tensão de rotura à tração f_{ub} , de 460⁸ MPa, faz-se a verificação de segurança desta ligação tendo em conta as expressões anteriores e os esforços obtidos no modelo de elementos finitos, nos elementos de ligação.

Para concluir, propõe-se a utilização da hipótese 3 em virtude das duas anteriores se mostrarem pouco adequadas. A primeira hipótese apresenta deslocamentos incompatíveis e a segunda simula um comportamento que não está de acordo com a realidade.

⁸ Adotam-se as características do Aço A400

4. Casos de Estudo

De forma a poder estudar a evolução nos métodos de construção e o tipo de comportamento das asnas de cobertura *palladianas*, foram estudadas três coberturas com esta tipologia, mas de épocas diferentes.

A primeira, construída no século XVI, é a cobertura da nave da Igreja de S. Roque em Lisboa, de asna *palladiana* composta com escoras e vão aproximado de 19 metros. O segundo caso é o da Sé Catedral de Santarém, construída no final do século XVII, com um vão menor, de cerca de 16 metros, sendo classificada como asna *Palladiana* composta. Por último, o caso do edifício do Asilo Militar de Runa, construído entre finais do século XVIII e início do século XIX, nas proximidades de Torres Vedras. Neste caso trata-se de uma estrutura *palladiana* simples com vão de 12 metros. Todos os casos apresentam o mesmo tipo de asna, mas todas com algumas particularidades que as distinguem entre si. Salienta-se o facto de Portugal ter sido, provavelmente, pioneiro no uso deste tipo de asna para um vão superior a 14 metros, contrariando a hipótese de Valeriani sobre o uso de asna *palladiana dupla* para vãos superiores a 14 metros, como foi visto no subcapítulo 2.2.1.

O estudo da evolução das estruturas de cobertura desta tipologia é realizado através da comparação entre os casos de estudo e complementado com a verificação da segurança estrutural de cada um deles.

4.1. Caso de Estudo 1 – Igreja de S. Roque em Lisboa

4.1.1. Resenha Histórica

No início do século XVI, encontrava-se no local da atual Igreja de S. Roque um cemitério onde eram sepultadas as vítimas da peste. Por destacados feitos e milagres atribuídos a S. Roque contra este flagelo, foi pedida por D. Manuel I, uma relíquia deste santo, a fim de proteger a população de Lisboa. Foi então construída pelos habitantes de Lisboa uma ermida manuelina denominada Ermida de S. Roque para que a população pudesse venerar a relíquia. Em 1553, é concedida à Companhia de Jesus¹ a posse da Ermida e no ano de 1555 iniciam-se trabalhos de ampliação da mesma, que viria a ser a sede da Ordem em Portugal.

De acordo com o padre Balthazar Telles “*veio um famoso Arquitecto, mandado por el Rey Católico Dom Philippe o prudente, o qual traçou a obra com um novo invento, nunca visto em Portugal, dispondo o tecto com tal traça, (...) que está seguríssimo, e parece que se sustenta no*

¹ A Companhia de Jesus chega a Portugal a convite de D. João III, iniciando a partir de Lisboa a sua atividade missionária, tendo escolhido o espaço da antiga Ermida de S. Roque para a construção da sua primeira Igreja e Casa Professa.

ar.” (Tellez, 1545). Este arquiteto, de nome Filipe Terzi², para além da conceção da cobertura com asnas *palladianas* compostas, com escoras diagonais, operou também modificações na fachada da igreja, tornando esta numa obra ímpar para a época.

A Igreja ganhou então a forma que tem nos dias de hoje (Figura 34) com um formato retangular, composta por uma só nave, uma capela-mor pouco profunda, e oito capelas laterais, sendo este modelo tradicionalmente designado por "igreja-salão". Em 1768, nove anos após a expulsão dos jesuítas de Portugal, a Igreja e a Casa Professa de S. Roque foram doadas, por D. José I, à Santa Casa da Misericórdia de Lisboa, entidade que ainda hoje tem a posse da Igreja e espaço envolventes.



Figura 34 – Fachada da igreja de S. Roque

Fonte: http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/Images/SIPAlmage.aspx?pid=13235

4.1.2. A Cobertura

A cobertura da Igreja de S. Roque, de asna *palladiana composta*, com escoras diagonais (Figura 35), viria a ser construída segundo as orientações do arquiteto Filipe Terzi e após consulta de outros prestigiados arquitetos. Esta asna é inspirada nas asnas construídas em Roma e uma prova disso é o facto dos pendurais não tocarem a linha, uma característica das asnas *palladianas* construídas em Roma, ao invés de outras, por exemplo de Veneza ou do Norte de Itália, em que o pendural é empalmado na linha (Valeriani, 2006).

² Filipe Terzi – Arquiteto e engenheiro militar italiano, contratado em Roma em 1576, foi nomeado *Mestre das Obras de el-Rei*, sendo o principal arquiteto do reino entre 1577 e 1597, data do seu falecimento.

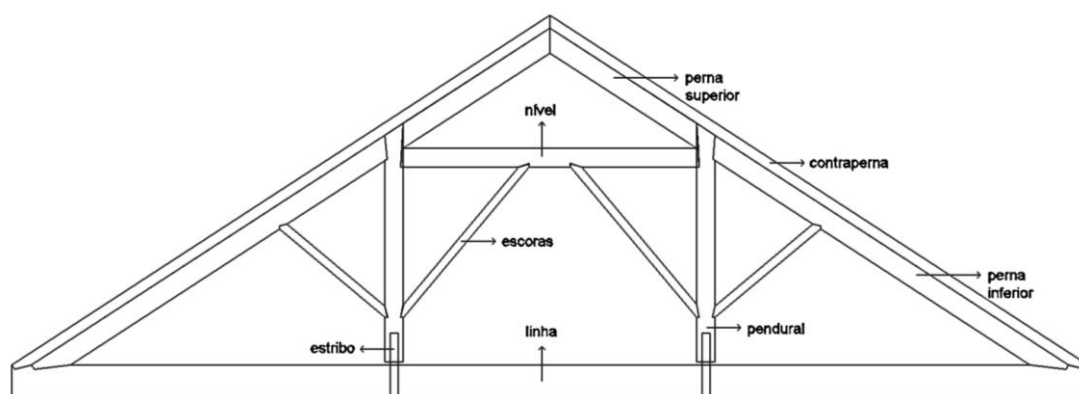


Figura 35 – Tipologia de asna da igreja de S. Roque

Fez-se então “*vir da Prusia os mastos, ou traves³, (...) destas lançou doze, cada huma de noventa & sete palmos de comprimento, & de notável grossura que acentam, & pegam nos frechaes, que estam encaixados sobre as cornijas; & logo ao sopé destas grossas linhas (...) fez estribar, & levantar, em modo de esquadria (...)*” (Tellez, 1545). Dada a imponência da estrutura recorreu-se ao uso de *perna* e *contraperna*, travadas por uma trave de *nível* ligadas a dois *pendurais* “*cada hum de vinte & quatro palmos de comprimento, os quaes vam a prumo (...) como columnas pêra sustentar o madeiramento do forro mas com esta diferença (...), com notável novidade sustentam, ou levantam o pezo pela parte que, houvera de ser baze destas colunas⁴; & sem carregar nas traves, que atravessaro a Igreja*” (Tellez, 1545). Apesar da descrição referir que o teto e consequente vão da estrutura, têm cerca de 17 metros, tal não é verdade, pois por medição direta constata-se que a linha tem um vão aproximado de 19 metros, assentando nas extremidades das paredes da Igreja, Figura 36.

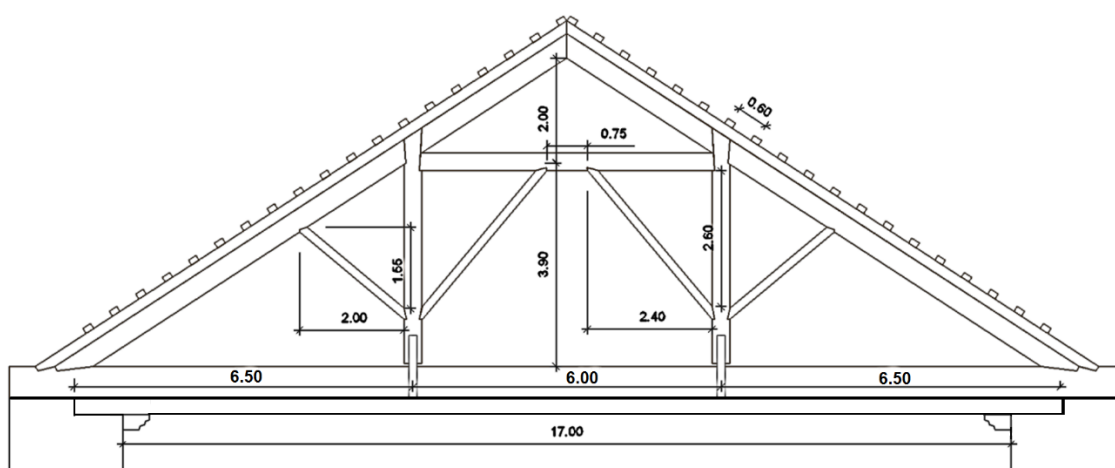


Figura 36 – Dimensões da asna tipo da igreja de S. Roque

³ Mastos ou traves também conhecidos por *linha*.

⁴ A base das “*colunas*” que neste caso se refere aos *pendurais* são os estribos em ferro que servem de apoio à linha.

Quanto aos elementos constituintes da asna tipo da Igreja, apresenta-se na Tabela 11 as suas dimensões, bem como outras características desta cobertura. Este registo foi conseguido através de medição direta dos elementos da asna, em inspeções feitas ao local.

Tabela 11 – Características da asna-tipo da igreja de S. Roque

Elemento	Largura b [m]	x	Altura h [m]	
Linha	0.35	x	0.44	Abertura
Pendural	0.40	x	0.35	33°
Contraperna	0.35	x	0.20	afast. entre asnas
Perna sup.	0.35	x	0.35	3,6 m
Perna inf.	0.35	x	0.35	Vão
Nível	0.35	x	0.35	19 m
Escora	0.15	x	0.30	
Madre	0.11	x	0.17	

A descrição de época ajuda a construir o modelo numérico da estrutura, e também, a explicar a forma que se encontrou para vencer tal vão apenas com uma asna⁵. Embora, inicialmente, a cobertura tenha sido executada para ser vista do interior da Igreja, tal acabou por não se verificar uma vez que em 1588-89 é executado o teto da mesma, apoiando (juntamente com o forro) na *linha* da asna, aumentando assim a carga atuante nas asnas.



Figura 37 – Cobertura da igreja de S. Roque – Fotografia de João Sarrazola

Como se pode observar na Figura 37, a estrutura foi alvo de intervenções de reabilitação e restauro em 1998, sobretudo para fazer face aos efeitos das ações horizontais. Nesta dissertação apenas se tem em conta o sistema estrutural inicialmente projetado, avaliando-se unicamente os efeitos das ações verticais.


⁵ Simona Valeriani relata a utilização de asnas duplas de *palladio*, a que chama “*double palladiana*” no artigo *Historic Carpentry in Rome*, 2003, para vãos superiores a 14 metros.

4.1.3. Análise Estrutural

4.1.3.1. Propriedades dos Materiais

Como foi referido, a madeira utilizada na cobertura da igreja de S. Roque era proveniente do Leste Europeu, o que obrigou a um transporte marítimo. Na análise *in situ* da asna de cobertura, verificou-se que a mesma é pinho de riga, Tabela 12, madeira altamente resistente e rígida, de pinheiro oriundo da flora do Norte da Europa.

Tabela 12 – Classificação da madeira da cobertura da igreja de S. Roque

Tipo de madeira	Nome científico	Classe de resistência ⁶	
Riga	<i>Larix deciduas</i>	C30	

De acordo com a classe de resistência da madeira de S. Roque, presente na Tabela 12, é possível chegar às propriedades mecânicas da Tabela 13 e da Tabela 14, mediante consulta da norma EN 338.

Tabela 13 – Propriedades mecânicas de resistência da madeira da asna da igreja de S. Roque

Propriedades mecânicas de resistência	Valores característicos [MPa]		Valores de cálculo [MPa]	
Resistência à flexão	$f_{m,k}$	30	$f_{m,d}$	23.08
Resistência à tração na direção do veio	$f_{t,0,k}$	18	$f_{t,0,d}$	13.85
Resistência à tração na direção perpendicular ao veio	$f_{t,90,k}$	0.6	$f_{t,90,d}$	0.46
Resistência à compressão na direção do veio	$f_{c,0,k}$	23	$f_{c,0,d}$	17.69
Resistência à compressão na direção perpendicular ao veio	$f_{c,90,k}$	2.7	$f_{c,90,d}$	2.08
Resistência ao corte	$f_{v,k}$	3	$f_{v,d}$	2.31

Tabela 14 – Propriedades mecânicas de rigidez da madeira da asna da igreja de S. Roque

Propriedades mecânicas de rigidez			
Valor médio do Módulo de Elasticidade ao longo do veio	$E_{0,mean}$	12	GPa
Valor do Módulo de Elasticidade ao longo do veio de 95% da amostra	$E_{0,05}$	8	GPa
Valor médio do Módulo de Elasticidade na perpendicular ao veio	$E_{90,mean}$	0.4	GPa
Valor médio do Módulo de Elasticidade transversal	G_{mean}	0.75	GPa
Densidade	ρ_k	3.8	kN/m ³
Densidade média	ρ_{mean}	4.6	kN/m ³

De referir que os valores de cálculo das propriedades mecânicas de resistência da Tabela 13, devem ser multiplicados pelo fator k_{mod} , em função da classe e duração da ação predominante, da combinação de ações em análise.

⁶ A classe de resistência é avaliada pelas normas EN 338:2003 e EN 1912:2004+A1:2007

4.1.3.2. Quantificação das Ações

- Carga Permanente

O peso próprio dos elementos que constituem a cobertura de S. Roque está representado na Tabela 15. No que diz respeito à restante carga permanente (de acordo com a Tabela 8), incluiu-se a cobertura, o peso do pavimento e do teto.

Tabela 15 – Propriedades dos elementos estruturais da igreja de S. Roque

Elemento	Largura b [m]	x	Altura h [m]	p_p [kN/m]	w [m ³]
Linha	0.35	x	0.44	0.708	0.01129
Pendural	0.40	x	0.35	0.644	0.00817
Contraperna	0.35	x	0.20	0.322	0.00233
Perna Sup.	0.35	x	0.35	0.564	0.00715
Perna Inf.	0.35	x	0.35	0.564	0.00715
Nível	0.35	x	0.35	0.564	0.00715
Escora	0.15	x	0.30	0.207	0.00225
Madre	0.11	x	0.17	0.086	-

- Ação Variável Q_1 – Sobrecarga na cobertura e pavimento – de acordo com a Tabela 9
- Ação variável Q_2 – Vento

$$W = W_i + W_e$$

$$\rightarrow W_i = C_{pi} \times q_p(z_i)$$

- C_{pi} (Sucção) = - 0,3
(Pressão) = + 0,2

- $q_p = c_e(z) \times q_b = 0,5625 \times 1,45 = 0,816 \text{ kN/m}^2$

$$\checkmark q_b = 0,5 \times 1,25 \times V_b^2 = 562,5 \text{ N/m}^2$$

$$\blacksquare V_b = 1 \times 1 \times V_{b,0} = 30 \text{ m/s}$$

$V_{b,0} = 30 \text{ m/s}$ – Lisboa encontra-se na zona B

$$\checkmark c_e = 1,45$$

- Categoria de terreno – Zona IV
- Altura do edifício – 15 metros

$$\rightarrow W_e = C_{pe} \times q_p(z_e)$$

- $q_p(z_e) = 0,816 \text{ kN/m}^2$
- C_{pe} de acordo com a Tabela 16,

Tabela 16 – Coeficientes de pressão exterior para a cobertura da igreja de S. Roque

	Zona			
	G	H	I	J
C _{pe1}	-0.40	-0.16	-0.36	-0.46
C _{pe2}	0.70	0.44	0.00	0.00

α	33°
----------	-----

O valor final de pressão w , na cobertura, Figura 38, tem em conta a situação mais desfavorável da combinação das pressões interiores w_i e exteriores w_e .

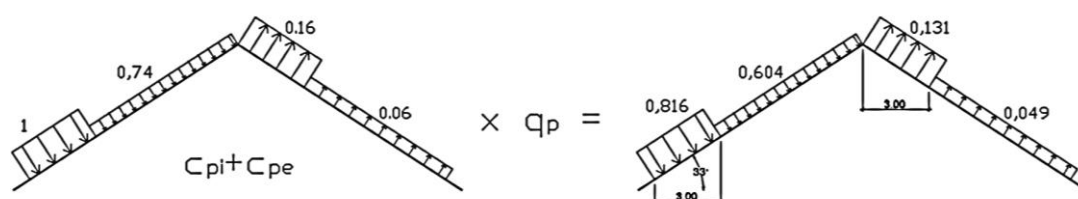


Figura 38 – Valores finais de pressão em kN/m² da cobertura da igreja de S. Roque

Os valores de pressão obtidos e representados na Figura 38, resultam em esforços contínuos ao longo das madres (Figura 39), que, por sua vez, resultam em cargas verticais e horizontais (Figura 40).

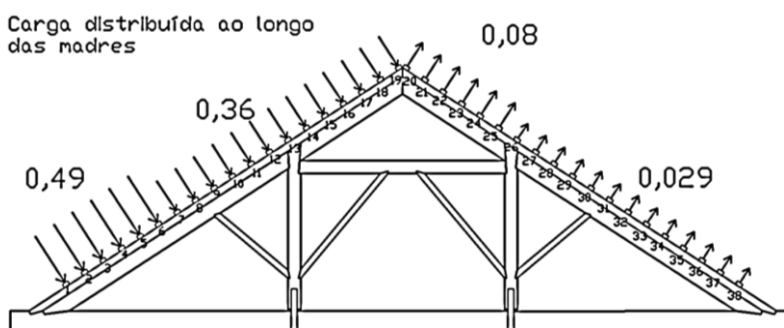


Figura 39 – Carga distribuída ao longo das madres em kN/m

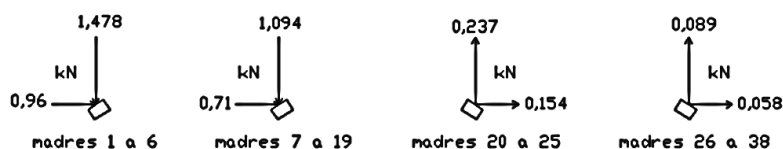


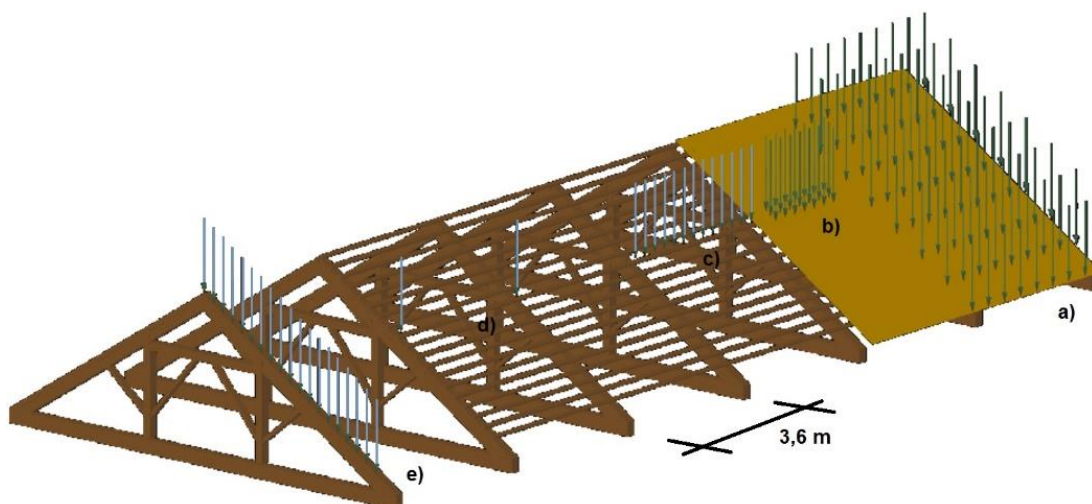
Figura 40 – Esforços atuantes relativos ao vento, em cada madre da asna

4.1.3.3. Modelo de Cálculo

Depois de quantificadas as ações, importa perceber como se faz o encaminhamento das cargas na estrutura da cobertura, desde as telhas até aos elementos estruturais. A cobertura é composta

por um forro que descarrega diretamente nas *madres* e estas (que fazem a ligação entre asnas) assentam na *contraperna* das mesmas.

Relativamente à carga inferior, forro e teto de madeira forrado a gesso, são suspensos pela *linha* através de ganchos, distanciados de 2 em 2 metros. A carga no pavimento da cobertura é afetada unicamente pelo afastamento de 3,6 metros entre asnas.



- a) Carga distribuída pelo forro em kN/m^2 ;
- b) Área de influência de uma mãe e respetiva carga;
- c) Carga distribuída ao longo da mãe kN/m ;
- d) Reações nas extremidades da mãe – carga em kN que é transmitida à contraperna;
- e) Conjunto de cargas transmitidas das madres à asna – kN .

Figura 41 – Modelo de encaminhamento de cargas da cobertura da igreja de S. Roque

Na Figura 42 representam-se as cargas verticais R_{IV} e cargas horizontais, R_{IH} , que são transmitidas às asnas.

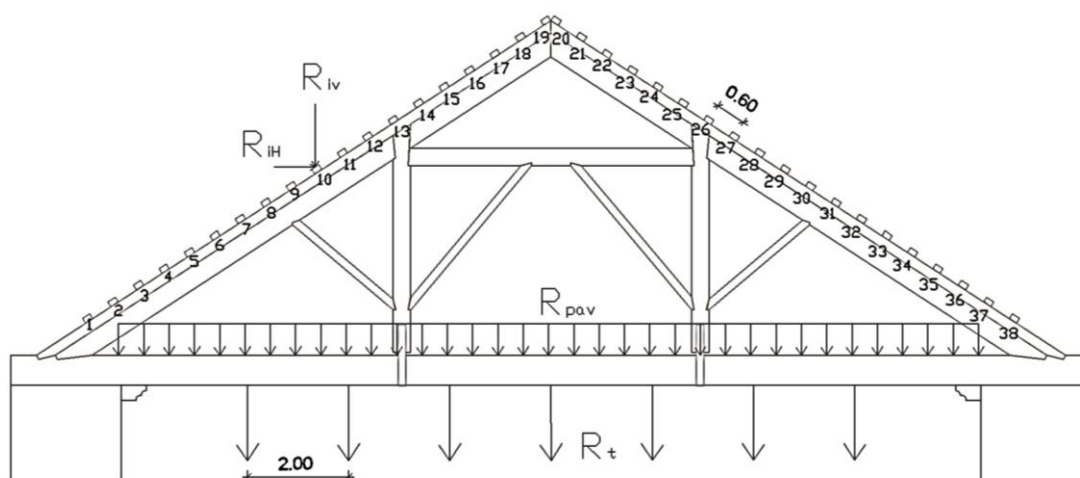


Figura 42 – Forças atuantes na asna da igreja de S. Roque

- Modelo Estrutural

O modelo estrutural das asnas da cobertura da igreja de S. Roque seguem a hipótese 3 apresentada na secção 3.3. tendo-se utilizado a madeira e o “material rígido” como materiais constituintes dos diversos elementos, tendo este último material apenas a função ligar a *contraperna* à *perna*. As cargas foram introduzidas de acordo com a combinação de ações em análise (Figura 43).

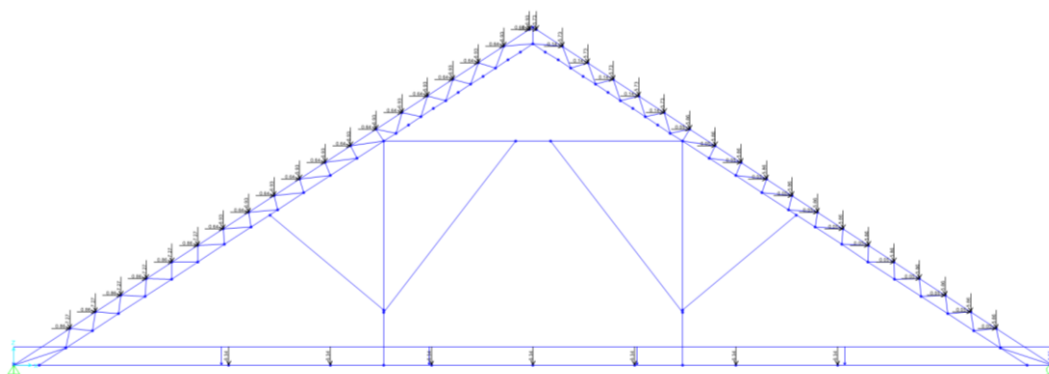


Figura 43 – Modelo numérico da asna da igreja de S. Roque - 2D

Na Figura 44 pode observar-se o modelo em três dimensões, e respetiva discretização da *perna* superior e inferior, seguindo a hipótese 3 referida no capítulo 3.

A verificação de segurança da ligação entre a contraperna e a perna está descrita na secção 4.1.3.5..

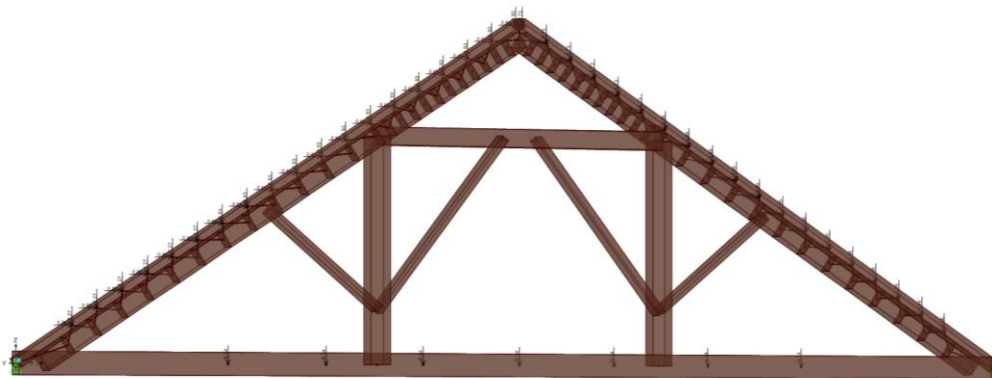


Figura 44 – Modelo numérico em 3D

4.1.3.4. Cargas Atuantes

Após a definição do modelo numérico, há que introduzir as cargas atuantes na asna, de acordo com a combinação adequada. Tendo em conta o modelo de cálculo enunciado na secção 4.1.3.3 e as ações da secção 4.1.3.2, obtém-se as cargas indicadas na Tabela 17, na Tabela 18, e na Tabela 19.

Tabela 17 – Ações atuantes relativos a G e SC

Comb.	P _{sd} [kN/m ²]	@ asnas [m]	@ madres [m]	P _{sd} /madre [kN/m]	R _{V_SC} [kN]	R _{V_G} [kN]	R _{V_SC+G} [kN]
[1]	2.558	3.6	0.6	1.535	1.296	4.646	5.942
[2]	1.958			1.175	0.000	4.646	4.646
[3]	1.850			1.110	0.864	3.442	4.306
[4]	1.450			0.870	0.000	3.442	3.442

Tabela 18 – Ações totais atuantes por madre

Combinação	Madres 1 a 6		Madres 7 a 19		Madres 20 a 25		Madres 26 a 38	
	R _V [kN]	R _H [kN]	R _V [kN]	R _H [kN]	R _V [kN]	R _H [kN]	R _V [kN]	R _H [kN]
[1]	7.273	0.864	6.927	0.639	5.729	-0.138	5.862	-0.052
[2]	6.864	1.440	6.287	1.066	4.291	-0.230	4.513	-0.086
[3]	5.193	0.576	4.962	0.426	4.164	-0.092	4.252	-0.035
[4]	4.920	0.960	4.536	0.710	3.205	-0.154	3.353	-0.058

Tabela 19 – Ações atuantes ao nível da base da cobertura - pavimento e teto

Combinação	P _{sd} Forro [kN/m ²]	@ ripado [m]	P _{sd} /ripa [kN/m]	p _p Ripa [kN/m]	R _t [kN]	R _{pav} [kN/m]
[1]	0.81	2	1.62	0.140	6.335	8.820
[2]	0.81		1.62	0.140	6.335	2.430
[3]	0.6		1.2	0.104	4.693	3.240
[4]	0.6		1.2	0.104	4.693	1.800

4.1.3.5. Resultados e Verificações de Segurança Estrutural

Depois de introduzidas as cargas no modelo numérico, determinam-se os esforços máximos em cada elemento, Tabela 20.

Tabela 20 - Esforços internos relativos ao estado limite último

Elemento	Comb. [1]				Comb. [2]			
	M máx [kNm]	V máx [kN]	N máx [kN]	N em M Máx [kN]	M máx [kNm]	V máx [kN]	N máx [kN]	N em M Máx [kN]
Linha	55.12	51.97	451.56	360.31	33.00	56.53	279.11	265.74
Pendural	37.79	35.17	88.57	29.20	35.48	33.18	75.84	72.95
Contraperna	6.52	5.17	-370.67	-	4.18	4.09	-265.91	-
Perna Superior	1.92	5.17	-63.30	-	1.82	3.86	-49.17	-
Perna Inferior	21.00	54.50	-276.51	-83.11	19.51	37.99	-196.68	-68.87
Nível	5.84	5.90	-277.49	-	6.66	9.65	-197.10	-
Escora Interior	0.39	0.36	-12.75	-	0.39	0.36	-16.96	-
Escora Exterior	0.23	0.31	-57.94	-	0.23	0.31	-49.96	-

Na Tabela 21 indicam-se os valores dos deslocamentos nos elementos condicionantes, *linha* e *perna* inferior, obtidos nas combinações de Estado Limite de Serviço.

Tabela 21 – Deslocamentos relativos ao estado limite de serviço

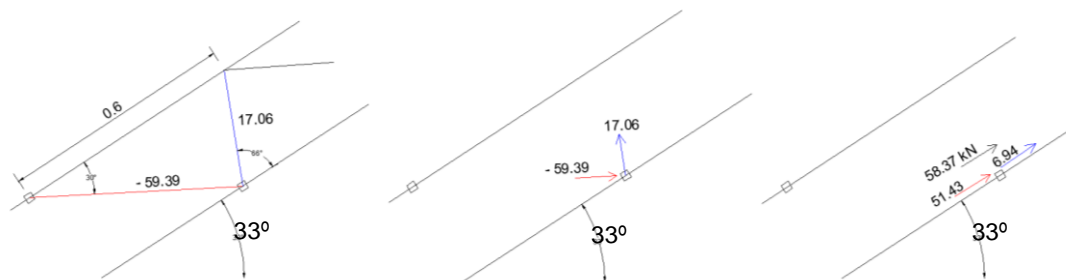
		w_{inst_G} [m]	w_{inst_Q1} [m]	w_{inst_Q2} [m]
Comb [3]	Linha	0.0060	0.0030	0.0020
	Perna inf.	0.0049	0.0023	0.0019
Comb. [4]	Linha	0.0060	-	0.0024
	Perna inf.	0.0043	-	0.0024

Com os resultados obtidos efetuaram-se as verificações de segurança segundo o Eurocódigo 5, para os estados limite último e de serviço, e ainda a verificação da segurança na ligação entre *contraperna* e *perna*, de forma a atestar a adequabilidade do modelo utilizado.

- Verificação da Ligação

As características dos cravos de ligação são as descritas em 3.3., e de acordo com o modelo numérico o local de ligação mais condicionante tem-se os seguintes esforços,

$$F_{Ved} = 58.37 \text{ kN (para o caso mais condicionante)}$$



A força resistente F_{Vrd} é dada por,

$$F_{Vrd} = \frac{0.6 \times 460 \times 10^2 \times \pi}{1.25} \times 10^{-3} = 69.37 \text{ kN}$$

Uma vez que $F_{Vrd} > F_{Ved}$ está garantida a segurança da ligação entre a *perna* e a *contraperna*, tendo-se considerado um afastamento dos cravos de 0,6 m⁷. Esta verificação atesta o modelo numérico utilizado, comprovando serem credíveis os esforços axiais gerados pelos “troços rígidos” modelados.

⁷ Espaçamento introduzido entre os elementos de ligação da *contraperna* à *perna* no modelo numérico.

- Verificações ao Estado Limite Último

De acordo com a secção 3.2. efetuaram-se as verificações de segurança, neste caso tendo em conta o estado limite último. Utiliza-se o valor de k_{mod} 0.6, uma vez que a duração da ação condicionante é de longa duração (ações permanentes).

Verificação	Comb./Elemento(s) condicionante(s)	Condição a verificar			
[1]		$\sigma_{t,0,d} = N/A$ [MPa]	\leq	$f_{t,0,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Linha	2.93	\leq	8.31	✓
[2]		$\sigma_{c,0,d} = N/A$ [MPa]	\leq	$f_{c,0,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Contraperna	5.30	\leq	10.62	✓
	Comb [1] – Perna Inf.	2.26	\leq	10.62	✓
[3]		$\sigma_{m,d} = M/w$ [MPa]	\leq	$f_{m,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Linha	4.88	\leq	13.85	✓
[4]		$\tau_d = \frac{3 V_{ed}}{2 A x k_{cr}}$ [MPa]	\leq	$f_{v,d}$ [MPa]	
	Comb [2] - Linha	0.822	\leq	1.39	✓
[5]		$\sigma_{t,0,d}/f_{t,0,d}$	+	$\sigma_{m,d}/f_{m,d}$	≤ 1
	Comb [1] - Linha	0.282	+	0.352	= 0.634 ✓
[6]		$(\sigma_{c,0,d}/f_{c,0,d})^2$	+	$\sigma_{m,d}/f_{m,d}$	≤ 1
	Comb [1] - Perna	0.004		0.212	= 0.216 ✓
[6.1]	Comb [1] - Perna	L_{cr}		5.5	
		λ		92.04	
		λ_{rel}		1.571	> 0.3 ✗
	Verificação adicional ->	$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cy} f_{c,0,d}}$	+	$\sigma_{m,d}/f_{m,d}$	≤ 1
		0.42	+	0.212	= 0.632 ✓
		k_y	=	3.095	
		k_{cy}	=	0.152	

No presente caso de estudo, verifica-se a segurança estrutural da asna em todas as expressões anteriores.

- Verificações ao Estado Limite de Serviço

Relativamente ao Estado Limite de Serviço, os resultados apresentados na Tabela 23 referem-se às deformações instantânea e final, relativas às combinações de ações [3] e [4], nos elementos condicionantes. Da Figura 45 retiram-se os comprimentos dos elementos condicionantes na análise e verificação das deformações

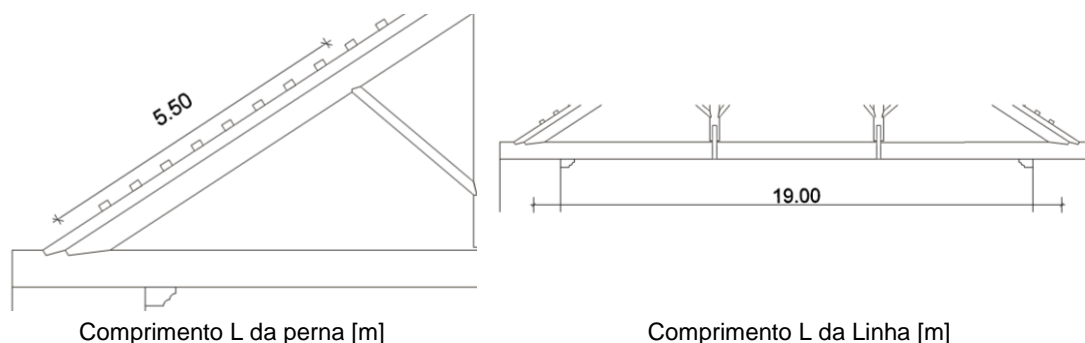


Figura 45 - Comprimento dos elementos em análise

De forma a verificar a segurança das deformações instantânea w_{inst} , e deformação final w_{fin} , os resultados da Tabela 23 são comparados com os valores-limite da Tabela 22. Conclui-se que em nenhum caso estes valores são atingidos.

Tabela 22 – Valores-limite das deformações instantânea e final

w_{inst}	\leq	Linha	0.0633	e	0.0380
		Perna	0.0183		0.0110
w_{fin}	\leq	Linha	0.1267	e	0.0633
		Perna	0.0367		0.0183

Tabela 23 – Verificações da deformação instantânea e final

		L	w_{inst_G} [m]	w_{inst_Q1} [m]	w_{inst_Q2} [m]	w_{fin} [m]
Comb. [3]	Linha	19	0.0060	0.0030	0.0020	0.0137
	Perna Inf.	5.5	0.0049	0.0023	0.0019	0.0113
Comb. [4]	Linha	19	0.0060	-	0.0024	0.0120
	Perna Inf.	5.5	0.0043	-	0.0024	0.0094

4.2. Caso de Estudo 2 - Sé Catedral de Santarém

4.2.1. Resenha Histórica

Santarém era uma cidade frequentemente usada pela coroa Portuguesa e na segunda metade do século XIII foram construídos os paços reais, nomeados de Alcáçova Nova.

Anos mais tarde, com a Companhia de Jesus já sediada em Portugal e a querer expandir a sua missão por território português, os jesuítas ficam com a posse dos antigos Paços Reais, doados por D. João IV em 1647. A 7 de maio de 1672 os padres jesuítas iniciaram a construção da Sé de Santarém, também conhecida por Igreja de N^{ra}. Sr^a. da Conceição.

As obras da fachada são de estilo maneirista, atribuídas a João Nunes Tinoco, com aprovação do Geral da Companhia de Jesus em Roma. Nas imediações foi construído um edifício imponente que serviria de Colégio dos Jesuítas, tendo ainda uma parte conventual. A construção

terminou em 1711, data inscrita na fachada, sendo o interior da Igreja de estilo barroco, de estrutura regular, com planta longitudinal composta por nave aberta para oito capelas laterais e uma capela-mor mais estreita (Figura 46) ao estilo jesuíta.

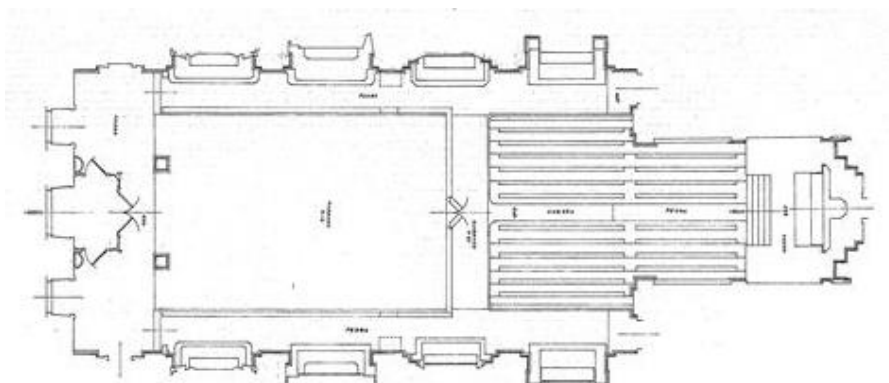


Figura 46 – Planta da nave e capelas da Sé Catedral de Santarém
Fonte: http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=10134

A cobertura do edifício é mista, sendo em abóboda nas capelas e plana, em madeira, na zona da nave, tendo no restante edifício zonas com duas ou quatro águas. A cobertura em análise é semelhante à da igreja de S. Roque, provavelmente porque ambas pertenciam à Companhia de Jesus, sendo a ideia original da igreja de S. Roque, trasladada para Santarém.

No final do século XVIII, os jesuítas são expulsos por ordem do Marquês de Pombal e D. Maria I doa parte do edifício ao cardeal Patriarca de Lisboa, D. Fernando de Sousa e Silva, que instala no local o Seminário Patriarcal de Santarém. Anos mais tarde, o edifício passa a ser utilizado como hospital, sofrendo sucessivas intervenções, até ser transformado em Sé Episcopal. Com a criação da diocese de Santarém, em 1975, o edifício passou a Sé Catedral (Figura 47).

De todas as intervenções que o edifício sofreu, nenhuma delas contemplou a da estrutura da cobertura, que se pensa estar ainda no seu estado original.



Figura 47 - Fachada principal da Sé Catedral de Santarém
Fonte: <http://www.pbbase.com/image/36839075>

4.2.2. A Cobertura

Construída no final do século XVII e princípio do século XVIII, aquando da construção do restante edifício da igreja, a estrutura da cobertura é muito semelhante à da igreja de S. Roque. A tipologia da asna *palladiana*, inspirou-se, certamente, na igreja de S. Roque. O vão é semelhante, embora ligeiramente inferior, cerca de 16 metros. Os elementos que constituem a asna da cobertura da Sé Catedral de Santarém são idênticos aos da asna da igreja de S. Roque, inclusivamente com a inclusão da *contraperna*, Figura 48.

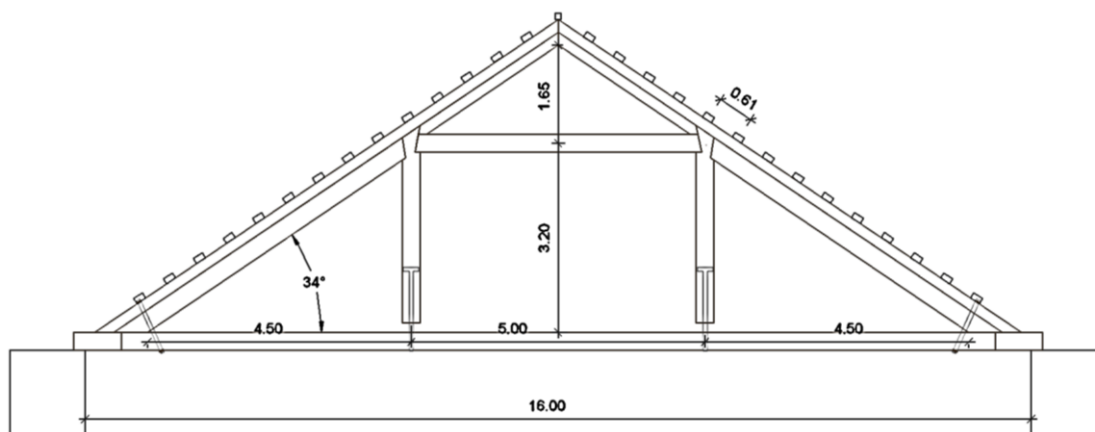


Figura 48 – Asna-tipo da Sé Catedral de Santarém

A diferença entre ambas as estruturas reside no facto de no, caso de Santarém, não existirem as escoras diagonais entre *pendurais* e *pernas*, sendo que também as secções neste caso são ligeiramente menores, Tabela 24.

Tabela 24 – Características da asna-tipo da Sé Catedral de Santarém

Elemento	Largura, b [m]	x	Altura, h [m]	
Linha	0.30	x	0.30	Abertura
Pendural	0.30	x	0.30	34°
Contraperna	0.30	x	0.18	@ entre asnas
Perna Sup.	0.30	x	0.18	3 m
Perna Inf.	0.30	x	0.30	Vão
Nível	0.30	x	0.30	16 m
Madre	0.18	x	0.15	

A estrutura da cobertura da Sé Catedral de Santarém pode ser classificada como asna *palladiana* composta, uma vez que, também, apresenta dois níveis de pernas – *perna* e *contraperna*, Figura 49. Segundo dados do Sistema de Informação para o Património Arquitetónico a cobertura foi restaurada em 1973, mas apenas o forro, o guarda-pó e as telhas sofreram intervenções. Através da análise *in situ* foi visível que a madeira da estrutura não sofreu qualquer intervenção, pensando-se estar no seu estado original.



Figura 49 – Cobertura da Sé Catedral de Santarém – Fotografia de João Sarrazola

As asnas, tal como na igreja de S. Roque, têm como função estrutural o suporte da cobertura da Igreja, mas também o suporte do seu forro e teto, através da sua suspensão com ganchos metálicos, como se observa na Figura 50.



Figura 50 – Apoio do forro e teto, inferiores à estrutura, na linha – Fotografia de João Sarrazola

4.2.3. Análise Estrutural

4.2.3.1. Propriedades dos Materiais

A madeira utilizada na construção da cobertura da Sé Catedral de Santarém, é tal como em S. Roque proveniente de pinheiro, mas neste caso, julga-se que oriundo do continente Americano (*Pitch Pine*) - Tabela 25. Trata-se de uma madeira muito rígida, com elevada durabilidade e resistente a fungos, o que explica a sua longa duração sem quaisquer intervenções de conservação. De acordo com a classe de resistência da madeira da Sé Catedral de Santarém, presente na Tabela 25, chega-se pela norma EN 338, às propriedades mecânicas da Tabela 26 e da Tabela 27.

Tabela 25 – Classificação da madeira da cobertura da Sé Catedral de Santarém


Tipo de Madeira	Nome Científico	Classe de Resistência	
Pitch Pine	<i>Pinus Rigida (caribaea)</i>	C24	

Tabela 26 – Propriedades mecânicas de resistência da madeira da asna da Sé Catedral de Santarém

Propriedades mecânicas de resistência	Valores característicos [MPa]		Valores de cálculo [MPa]	
Resistência à flexão	$f_{m,k}$	24	$f_{m,d}$	18.46
Resistência à tração na direção do veio	$f_{t,0,k}$	14	$f_{t,0,d}$	10.77
Resistência à tração na direção perpendicular ao veio	$f_{t,90,k}$	0.5	$f_{t,90,d}$	0.38
Resistência à compressão na direção do veio	$f_{c,0,k}$	21	$f_{c,0,d}$	16.15
Resistência à compressão na direção perpendicular ao veio	$f_{c,90,k}$	2.5	$f_{c,90,d}$	1.92
Resistência ao corte	$f_{v,k}$	2.5	$f_{v,d}$	1.92

Tabela 27 – Propriedades mecânicas de rigidez da madeira da asna da Sé Catedral de Santarém

Propriedades mecânicas de Rigidez			
Valor médio do Módulo de Elasticidade ao longo do veio	$E_{0,mean}$	11	GPa
Valor do Módulo de Elasticidade ao longo do veio de 95% da amostra	$E_{0,05}$	7.4	GPa
Valor médio do Módulo de Elasticidade na perpendicular ao veio	$E_{90,mean}$	0.37	GPa
Valor médio do Módulo de Elasticidade transversal	G_{mean}	0.69	GPa
Densidade	ρ_k	3.5	kN/m ³
Densidade média	ρ_{mean}	4.2	kN/m ³

De referir que os valores de cálculo das propriedades mecânicas de resistência da Tabela 26, deverem ser multiplicados pelo fator k_{mod} , em função da classe e duração da ação predominante, na combinação de ações em análise.

4.2.3.2. Quantificação das Ações

- Carga Permanente

O peso próprio dos elementos que constituem a cobertura da Sé Catedral de Santarém está representado na Tabela 28. A restante carga permanente, está indicado na Tabela 8, onde se incluiu a restante carga permanente da cobertura, o peso próprio do pavimento e do teto.

Tabela 28 – Propriedades dos elementos estruturais da Sé de Santarém

Elemento	Largura b [m]	x	Altura h [m]	p_p [kN/m]	w [m ³]
Linha	0.30	x	0.30	0.378	0.00450
Pendural	0.30	x	0.30	0.378	0.00450
Contraperna	0.30	x	0.18	0.227	0.00162
Perna sup.	0.30	x	0.18	0.227	0.00162
Perna inf.	0.30	x	0.30	0.378	0.00450
Nível	0.30	x	0.30	0.378	0.00450
Madre	0.18	x	0.15	0.113	-

- Ação Variável Q_1 – Sobrecarga na cobertura e pavimento – de acordo com a Tabela 9

- Ação variável Q_2 – Vento

$$W = W_i + W_e$$

$$\rightarrow W_i = C_{pi} \times q_p(Z_i)$$

- C_{pi} (Sucção) = - 0,3
(Pressão) = + 0,2

- $q_p = c_e(z) \times q_b = 0,455625 \times 1,45 = 0,66 \text{ kN/m}^2$

$$\checkmark q_b = 0,5 \times 1,25 \times V_b^2 = 455,625 \text{ N/m}^2$$

$$\square V_b = 1 \times 1 \times V_{b,0} = 27 \text{ m/s}$$

$V_{b,0} = 27 \text{ m/s}$ – Santarém encontra-se na zona A

$$\checkmark c_e = 1,45$$

- Categoria de terreno – Zona IV
- Altura do edifício – 15 metros

$$\rightarrow W_e = C_{pe} \times q_p(Z_e)$$

- $q_p(Z_e) = 0,66 \text{ kN/m}^2$
- C_{pe} de acordo com a Tabela 29,

Tabela 29 – Coeficientes de pressão exterior para a cobertura da Sé Catedral de Santarém

	Zona			
	G	H	I	J
C_{pe1}	-0.37	-0.15	-0.35	-0.45
C_{pe2}	0.70	0.45	0.00	0.00

α	34°
----------	-----

O valor final de pressão w , na cobertura, tem em conta a situação mais desfavorável da combinação das pressões interiores w_i e exteriores w_e (Figura 51),

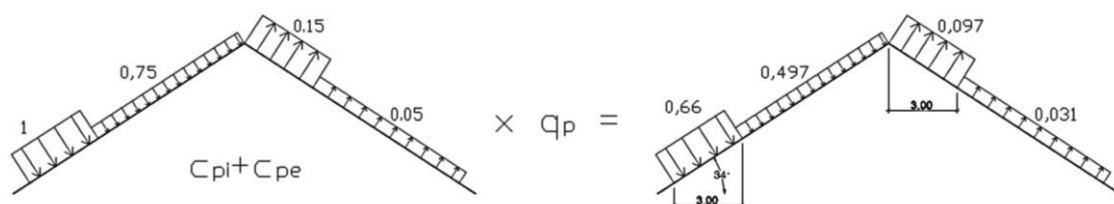


Figura 51 – Valor final de pressão da cobertura da Sé Catedral de Santarém

Os valores de pressão obtidos e representados na Figura 51, resultam nas ações contínuas ao longo das madres indicadas na Figura 52, que, por sua vez, resultam nas cargas verticais e horizontais da Figura 53.

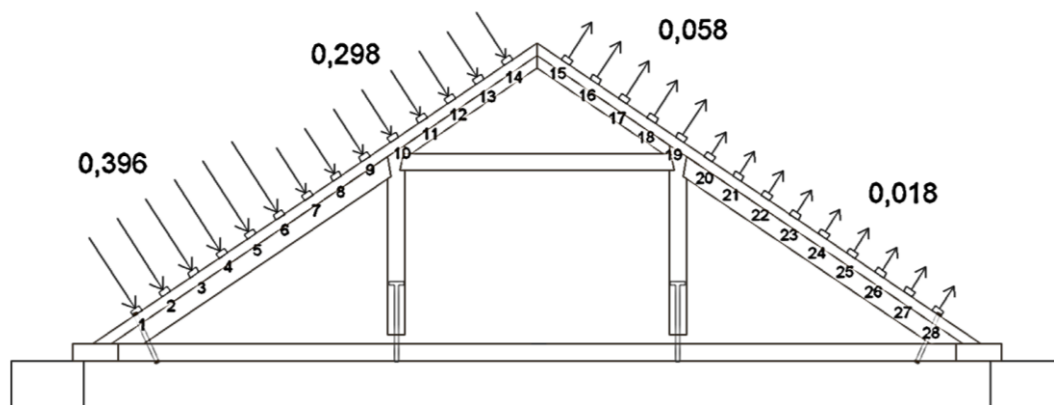


Figura 52 – Carga distribuída ao longo das madres em kN/m

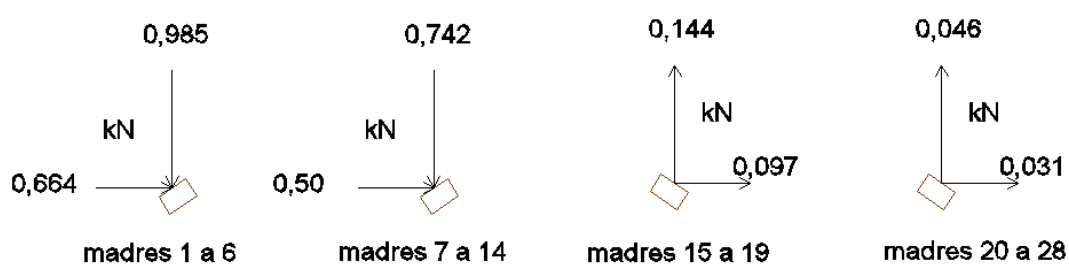
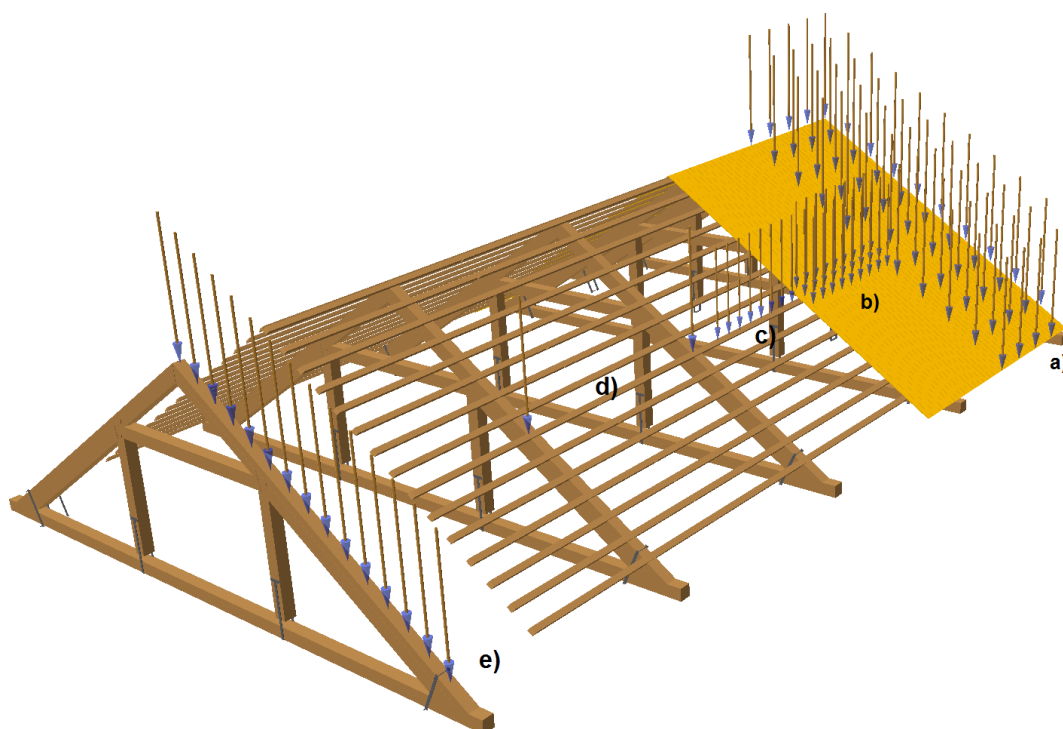


Figura 53 – Esforço atuante em cada madre relativo à ação do vento

4.2.3.3. Modelo de Cálculo

A cobertura da Sé de Santarém é composta por um forro que descarrega diretamente nas *madres*, e estas fazem a ligação entre as asnas e assentam na *contraperna* das mesmas, .

Relativamente à carga inferior, o forro e o teto em madeira são suspensos pela *linha* através de ganchos, distanciados de 2,5 metros. A carga no pavimento ao nível da cobertura, é aplicada diretamente às asnas, tendo em conta uma largura de influência de 3 metros entre asnas.



- a) Distribuição uniforme da carga na cobertura;
- b) Carga relativa à largura de influência da madre – 0.6 metros;
- c) Carga equivalente que atua sobre a madre;
- d) Reações nas extremidades das madres que representam a carga que a asna recebe de uma madre;
- e) A totalidade das cargas pontuais provenientes das madres, atuantes num dos lados da asna.

Figura 54 – Modelo de encaminhamento das cargas da cobertura da Sé Catedral de Santarém

As ações resultantes na cobertura que chegam à estrutura através das madres, são as cargas verticais R_{IV} e as cargas horizontais, R_{IH} (Figura 55). A carga distribuída R_{pav} refere-se à carga atuante sobre o pavimento da asna e a carga R_t é relativa ao forro e ao teto da Igreja.

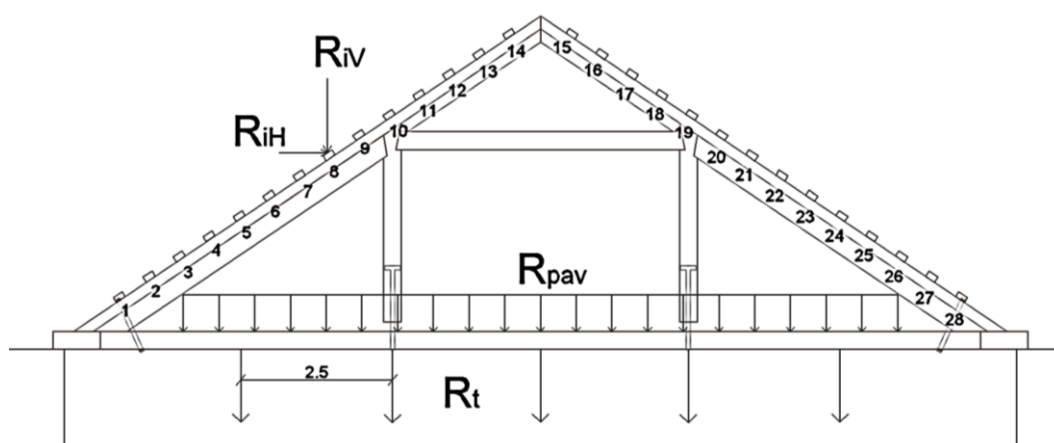


Figura 55 – Forças atuantes na asna da Sé Catedral de Santarém

- Modelo Estrutural

Tal como no caso de S. Roque, na modelação da asna da Sé Catedral de Santarém seguiu-se a hipótese 3, apresentada na secção 3.3. A Figura 56 representa o modelo construído no programa de cálculo automático SAP 2000®, onde se introduziram as cargas atuantes consoante a combinação em análise.

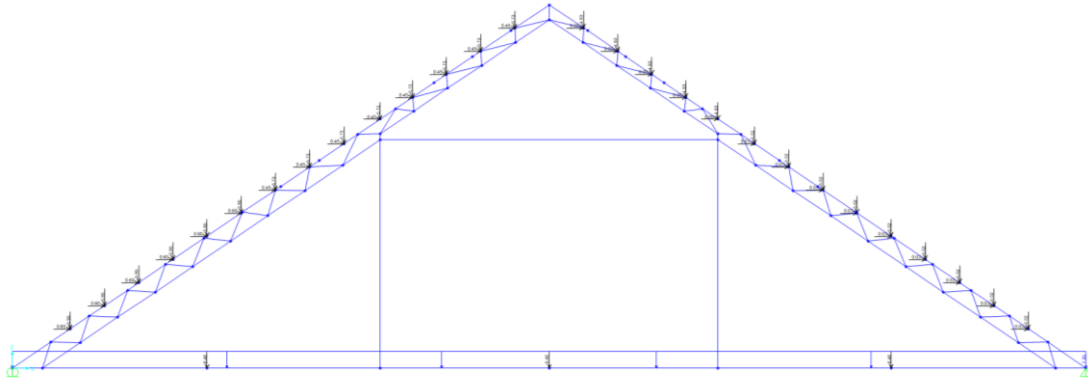


Figura 56 – Modelo numérico da Sé Catedral de Santarém - 2D

Na Figura 57 representam-se todos os elementos constituintes da asna *palladiana* da Sé de Santarém, em três dimensões, em que cada cor representa um elemento diferente. É visível também a discretização utilizada nos elementos principais, de modo a obter uma melhor aproximação de resultados.

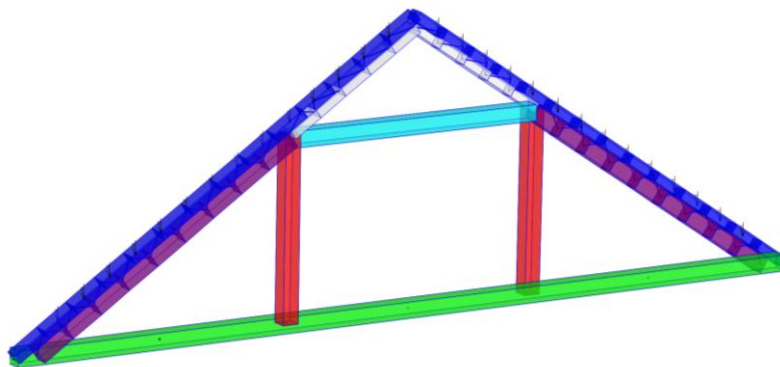


Figura 57 - Modelo 3D da asna da Sé de Santarém

4.2.3.4. Cargas Atuantes

Nas Tabelas 30 e 31 apresentam-se as cargas que atuam nas madres, na parte superior da estrutura e na Tabela 32 figuram as cargas que atuam na base da asna, referentes ao pavimento da cobertura, e ao forro e ao teto da Igreja.

Tabela 30 – Cargas atuantes ao nível da cobertura relativas a cargas permanente, G e restante carga permanente, RCP

Comb.	P _{sd} [kN/m ²]	@asnas [m]	@madres [m]	P _{sd} /madre [kN/m]	R _{V_SC} [kN]	R _{V_G} [kN]	R _{V_SC+G} [kN]
[1]	2.558	3	0.6	1.68759	1.080	3.983	5.063
[2]	1.958			1.32759	0.000	3.983	3.983
[3]	1.850			1.2234	0.720	2.950	3.670
[4]	1.450			0.9834	0.000	2.950	2.950

Tabela 31 – Cargas finais que atuam em cada madre

Comb.	Madres 1 a 6		Madres 7 a 14		Madres 15 a 19		Madres 20 a 28	
	R _V [kN]	R _H [kN]	R _V [kN]	R _H [kN]	R _V [kN]	R _H [kN]	R _V [kN]	R _H [kN]
[1]	5.949	0.598	5.731	0.450	4.933	-0.088	5.021	-0.028
[2]	5.460	0.996	5.096	0.751	3.766	-0.146	3.914	-0.047
[3]	4.261	0.399	4.115	0.300	3.584	-0.058	3.643	-0.019
[4]	3.935	0.664	3.692	0.500	2.806	-0.097	2.904	-0.031

Tabela 32 – Cargas atuantes ao nível da base da asna, relativas ao pavimento e teto

Comb.	P _{sd} Forro [kN/m ²]	@ripado [m]	P _{sd} /ripa [kN/m]	p _p Ripa [kN/m]	R _t [kN]	R _{pav} [kN/m]
[1]	0.81	2.5	2.025	0.128	6.458	7.350
[2]	0.81		2.025	0.128	6.458	2.025
[3]	0.6		1.500	0.095	4.784	2.700
[4]	0.6		1.500	0.095	4.784	1.500

4.2.3.5. Resultados e Verificações de Segurança Estrutural

Depois de introduzidas as cargas no modelo, obtiveram-se os esforços máximos em cada elemento, para cada uma das combinações, Tabela 33.

Tabela 33 – Esforços internos relativos ao estado limite último

Elemento	Comb. [1]				Comb. [2]			
	M máx [kNm]	V máx [kN]	N máx [kN]	N em M Máx [kN]	M máx [kNm]	V máx [kN]	N máx [kN]	N em M Máx [kN]
Linha	29.25	29.61	201.89	179.39	18.46	21.65	129.41	123.34
Pendural	8.55	2.23	51.67	-	8.82	11.48	27.99	-
Contraperna	3.63	8.67	-247.03	-	3.92	7.94	-158.06	-
Perna Sup.	0.78	1.64	-58.30	-	1.20	1.36	-60.43	-
Perna Inf.	13.94	16.43	-214.26	19.17	11.60	12.26	-166.71	-33.86
Nível	1.58	1.27	-173.38	-	1.58	1.27	-124.98	-

Na Tabela 34 indicam-se os valores obtidos nas combinações de estado limite de serviço, para os deslocamentos dos elementos condicionantes, *linha* e *perna* inferior.

Tabela 34 – Deslocamentos relativos ao estado limite de serviço

		w_{inst_G} [m]	w_{inst_Q1} [m]	w_{inst_Q2} [m]
Comb [3]	Linha	0.0049	0.002077	0.00207
	Perna Inf.	0.0042	0.00166	0.00239
Comb. [4]	Linha	0.0049	-	0.00295
	Perna Inf.	0.0042	-	0.003547

Com os resultados indicados nas tabelas anteriores fizeram-se as verificações de segurança estrutural segundo o Eurocódigo 5, para os estados limite último e de serviço. A verificação da ligação entre *perna* e *contraperna* foi feita de modo semelhante à desenvolvida para o caso da igreja de S. Roque, que, como os esforços na ligação são inferiores neste caso fica automaticamente verificada a segurança.

- Verificações ao Estado Limite Último

De acordo com a secção 3.2. efetuaram-se as verificações de segurança tendo em conta o estado limite último, e utilizou-se o valor de k_{mod} 0.6, uma vez que a duração da ação condicionante é de longa duração (ações permanentes).

Verificação	Comb./Elemento(s) condicionante(s)	Condição a verificar			
[1]		$\sigma_{t,0,d} = N/A$ [MPa]	\leq	$f_{t,0,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Linha	2.24	\leq	6.46	✓
[2]		$\sigma_{c,0,d} = N/A$ [MPa]	\leq	$f_{c,0,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Contraperna	4.57	\leq	9.69	✓
	Comb [1] – Perna inf.	2.38	\leq	9.69	✓
[3]		$\sigma_{m,d} = M/w$ [MPa]	\leq	$f_{m,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Linha	6.50	\leq	11.08	✓
[4]		$\tau_d = \frac{3 V_{ed}}{2 A x k_{cr}}$ [MPa]	\leq	$f_{v,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Linha	0.737	\leq	1.15	✓
[5]		$\sigma_{t,0,d}/f_{t,0,d}$	+	$\sigma_{m,d}/f_{m,d}$	≤ 1
	Comb [2] - Linha	0.308	+	0.587	= 0.895 ✓
[6]		$(\sigma_{c,0,d}/f_{c,0,d})^2$	+	$\sigma_{m,d}/f_{m,d}$	≤ 1
	Comb [2] - Perna	0.002		0.233	= 2.234

[6.1]	Comb [2] - Perna	L_{cr}		5.5		
		λ		63.51		
		λ_{rel}		1.077	> 0.3	✗
Verificação adicional ->		$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cy}f_{c,0,d}}$	+	$\sigma_{m,d}/f_{m,d}$	≤ 1	
		0.147	+	0.233	= 0.38	✓
		k_y	=	1.737		
		k_{cy}	=	0.264		

Tal como no caso da igreja de S. Roque, também a Sé Catedral de Santarém verifica a segurança estrutural em todos os pontos analisados e relativos ao estado limite último.

- Verificações ao Estado Limite de Serviço

Os resultados apresentados na Tabela 36 referem-se às deformações, instantânea e final, relativas às combinações de ações [3] e [4], nos elementos condicionantes. Na Figura 58 estão representados os comprimentos dos elementos condicionantes na verificação da deformação.

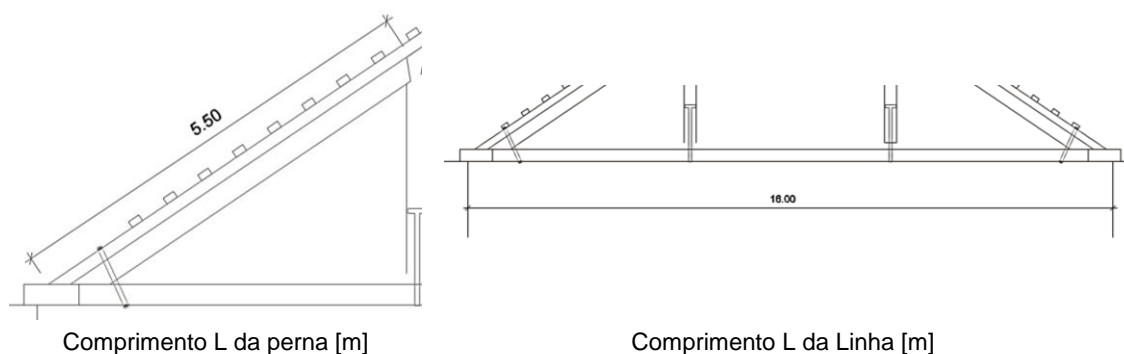


Figura 58 – Comprimento dos elementos em análise

A verificação da segurança das deformações instantânea w_{inst} , e deformação final w_{fin} , resulta da comparação dos resultados da Tabela 36 com os valores-limite da Tabela 35. Conclui-se que em nenhum caso estes valores são atingidos.

Tabela 35 – Valores-limite das deformações instantânea e final

w_{inst}	\leq	Linha	0.0533	e	0.0320
		Perna	0.0183		0.0110
w_{fin}	\leq	Linha	0.1067	e	0.0533
		Perna	0.0367		0.0183

Tabela 36 - Valores da deformação instantânea e final

		L	W _{inst_G} [m]	W _{inst_Q1} [m]	W _{inst_Q2} [m]	W _{fin} [m]
Comb [3]	Linha	16	0.0049	0.0021	0.0021	0.0112
	Perna Inf	5.5	0.0042	0.0017	0.0024	0.0098
Comb [4]	Linha	16	0.0049	-	0.0030	0.0108
	Perna Inf	5.5	0.0042	-	0.0035	0.0103

4.3. Caso de Estudo 3 – Edifício do Asilo Militar em Runa

4.3.1. Resenha Histórica

Edifício imponente, mandado construir por D. Maria Francisca Benedita, irmã mais nova de D. Maria I, que encontrou na construção de um hospital e abrigo para inválidos militares a forma de os homenagear pelas guerras travadas por Portugal. Apesar de pedir à sua irmã D. Maria I permissão para a construção do edifício, e de esta lhe ter oferecido terrenos para tal, a princesa quis ser ela mesma a pagar a obra. Daí ter comprado terrenos em Runa, nas proximidades de Torres Vedras, e ter confiado ao arquiteto José da Costa e Silva a autoria do edifício, em finais do século XVIII.

As obras iniciam-se em 1792 a mando de D. Maria I, e dados da época referem que eram mais de 300 os operários da obra. Com um traçado simples e elegante, a obra visava proporcionar um final de vida digno aos militares incapacitados. A princesa financiava as obras e nem mesmo quando a corte fugiu para o Brasil entre 1807 e 1821 a construção do edifício parou. Foi inaugurado pela princesa a 25 de julho de 1827, data do seu aniversário, e durante as festividades esta proclamou uma frase que ainda hoje permanece no átrio do edifício: *“Estimo ter podido concluir o hospital que mandei construir para descansardes dos vossos honrosos trabalhos; em recompensa, só vos peço a paz e o temor a Deus”*.

O edifício de forma retangular e estilo neoclássico, Figura 59, foi ocupado no dia de inauguração por 16 veteranos militares e foi continuamente sustentado por Maria Francisca Benedita, em vida, após a sua morte pelos bens por si deixados, situação que terminou poucos anos depois, com a passagem do Real Hospital de Veteranos para a administração do Estado Português, pelas dificuldades financeiras que o Hospital enfrentava depois de terminarem as riquezas da sua fundadora.



Figura 59 – Fachada principal do Asilo Militar de Runa – Fotografia de João Sarrazola

Ano após ano, o edifício e a área adjacente foram sendo melhorados e aumentados, na tentativa dar resposta ao crescente número de ocupantes. Atualmente é um Centro de Apoio Social nomeado de Asilo de Inválidos Militares, da responsabilidade do Instituto de Ação Social das Forças Armadas, pertencente ao Ministério da Defesa Nacional.

4.3.2. A Cobertura

A estrutura da cobertura, construída no início do século XIX, tem semelhanças com ambas as coberturas apresentadas nos subcapítulos anteriores, e apesar de ser mais “grosseira”, cumpre a mesma função estrutural de suportar carga vertical da cobertura do edifício. A primeira diferença entre esta solução e as precedentes tem a ver com o facto desta asna não suportar o teto do edifício, uma vez que este é suportado pelas espessas paredes autoportantes das fachadas laterais.

A estrutura pode ser classificada como asna *palladiana* singela, e apresenta um vão aproximado de 12 metros. Na Figura 60 é visível outra diferença relativamente às estruturas anteriores, pois neste caso há a introdução de um *pendural superior* que serve de apoio ao *nível* da asna e, também, da trave fileira, que ao contrário dos casos de estudo anteriores, onde não existe, tem a função de travar longitudinalmente as asnas.

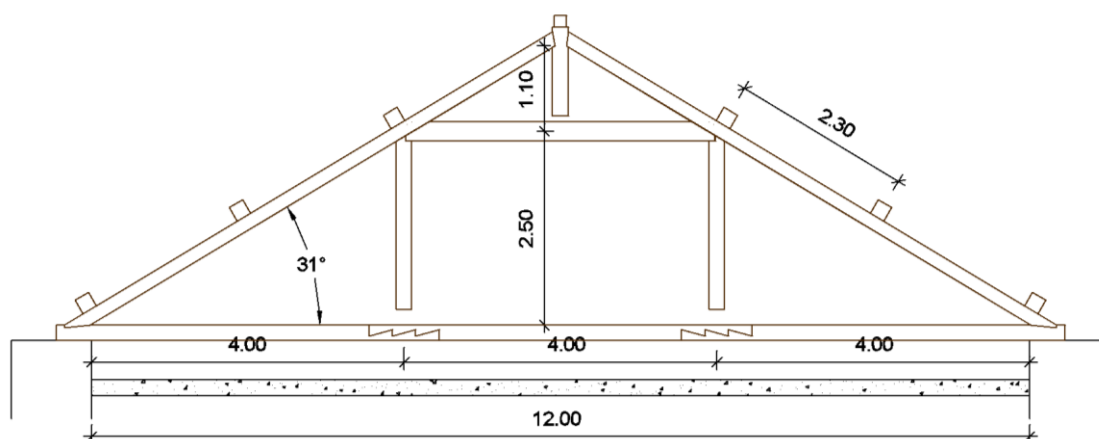


Figura 60 – Dimensões da asna-tipo do Asilo Militar de Runa

Relativamente aos elementos constituintes da asna de Runa, Tabela 37, salienta-se o facto de não existir contraperna, e das madres se apoiarem diretamente na perna. Neste caso as madres existem em menor quantidade, uma vez que existe um novo elemento – vara, que recebe as cargas da cobertura pelo forro, e as transmite às madres

Tabela 37 - Característica da asna-tipo do Asilo Militar de Runa

Elemento	Largura b [m]	x	Altura h [m]	
Linha	0.20	x	0.20	
Pendural	0.20	x	0.20	
Pendural sup.	0.20	x	0.15	
Perna	0.17	x	0.17	
Nível	0.15	x	0.25	
Madre	0.20	x	0.20	
Vara	0.10	x	0.10	
				Abertura
				31°
				@ entre asnas
				3.5 m
				Vão
				12 m

A estrutura é constituída por elementos típicos de asnas *palladianas*, e tem a particularidade de esta ser em madeira pouco trabalhada, medida essencialmente a palmo, e utilizada quase na sua forma original. Uma das razões para que a madeira neste caso tenha uma apresentação mais grosseira, Figura 61, prende-se com o facto de, neste caso, estar definido desde a sua conceção, que não seria uma cobertura à vista, isto é, estaria “escondida” da vista dos utilizadores.



Figura 61 – Asna da cobertura do Asilo Militar de Runa – Fotografia de João Sarrazola

Esta estrutura cobre todo o edifício na sua zona periférica, Figura 62, o que implica uma extensão de cerca de 320 metros. A necessidade de madeira só terá sido possível de colmatar através da utilização de árvores existentes nas proximidades, na grande maioria cedros, Tabela 38, o que se confirmou com a análise *in situ* da estrutura.

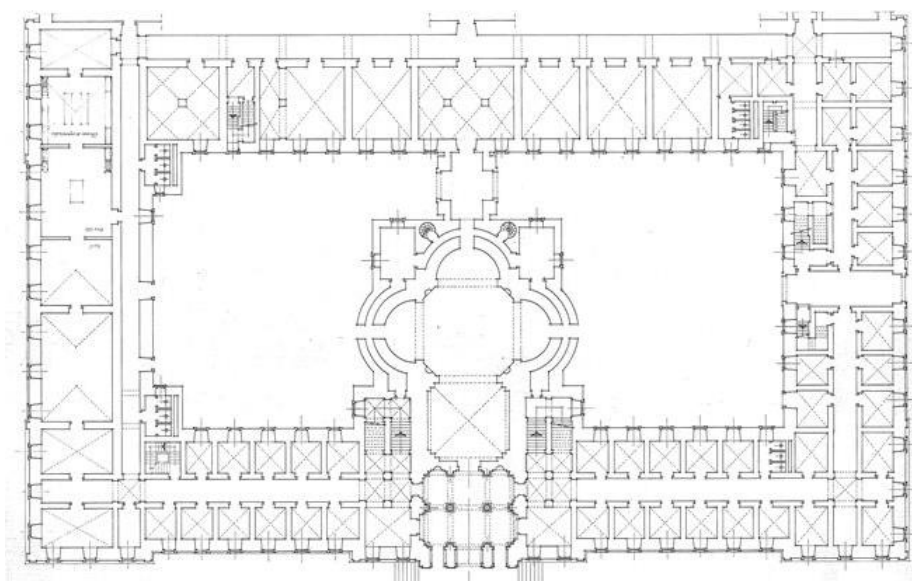



Figura 62 – Planta do edifício do Asilo Militar de Runa, coberto na maioria por asna *palladiana*
Fonte: http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=6339

4.3.3. Análise Estrutural

4.3.3.1. Propriedades dos Materiais

A madeira utilizada na estrutura, como referido, é cedro. Uma vez que não é possível obter uma classificação da sua resistência na norma EN338, seguiu-se uma classe de resistência intermédia, admitindo-se o valor da resistência à flexão de 25,5* MPa.

Tabela 38 - Classificação da madeira da cobertura do Asilo Militar de Runa

Tipo de Madeira	Nome Científico	Classe de Resistência	
Cedro	<i>Cedrela spp.</i>	-* (de acordo com EN384)	

De acordo com a classe de resistência adotada para a madeira do Asilo Militar de Runa, chega-se às propriedades mecânicas da Tabela 39 e da Tabela 40, mediante consulta da norma EN 384.

Tabela 39 – Propriedades mecânicas de resistência da madeira da asna do Asilo Militar de Runa

Propriedades Mecânicas de Resistência	Valores Característicos [MPa]		Valores de cálculo [MPa]	
Resistência à Flexão	$f_{m,k}$	25.5	$f_{m,d}$	19.62
Resistência à tração na direção do veio	$f_{t,0,k}$	15.3	$f_{t,0,d}$	11.77
Resistência à tração na direção perpendicular ao veio	$f_{t,90,k}$	0.6	$f_{t,90,d}$	0.46
Resistência à compressão na direção do veio	$f_{c,0,k}$	21.5	$f_{c,0,d}$	16.52
Resistência à compressão na direção perpendicular ao veio	$f_{c,90,k}$	3.1	$f_{c,90,d}$	2.37
Resistência ao Corte	$f_{v,k}$	2.7	$f_{v,d}$	2.05

Tabela 40 – Propriedades mecânicas de rigidez da madeira da asna do Asilo Militar de Runa

Propriedades Mecânicas de Rigidez			
Valor médio do Módulo de Elasticidade ao longo do veio	$E_{0,mean}$	9.63	GPa
Valor do Módulo de Elasticidade ao longo do veio de 95% da amostra	$E_{0,05}$	6.45	GPa
Valor médio do Módulo de Elasticidade na perpendicular ao veio	$E_{90,mean}$	0.32	GPa
Valor médio do Módulo de Elasticidade transversal	G_{mean}	0.6	GPa
Densidade	ρ_k	4.4	kN/m ³
Densidade Média	ρ_{mean}	5.3	kN/m ³

Como nos casos anteriores, os valores de resistência da Tabela 39, deverão ser multiplicados pelo fator k_{mod} em função da classe e duração da ação predominante, na combinação de ações em análise.

4.3.3.2. Quantificação das Ações

- Carga Permanente

O peso próprio dos elementos que constituem a cobertura do Asilo Militar de Runa está representado na Tabela 41. No que diz respeito à restante carga permanente, está de acordo com a Tabela 8, mas apenas inclui a restante carga permanente da cobertura e o peso próprio do pavimento, uma vez que não é a asna que suporta o teto do edifício, como demonstra a Figura 68.

Tabela 41 – Propriedades dos elementos estruturais do Asilo Militar de Runa

Elemento	Largura b [m]	x	Altura h [m]	p_p [kN/m]	w [m ³]
Linha	0.20	x	0.20	0.21	0.00133
Pendural	0.20	x	0.20	0.21	0.00133
Pendural Sup.	0.20	x	0.15	0.16	0.00075
Perna	0.20	x	0.20	0.21	0.00133
Nível	0.15	x	0.25	0.20	0.00156
Madre	0.20	x	0.20	0.21	-
Vara ⁸	Seção circular de diâmetro 0.1 m			0.05	-

- Ação Variável Q_1 – Sobrecarga na cobertura e pavimento – de acordo com a Tabela 9
- Ação variável Q_2 – Vento

$$W = W_i + W_e$$

$$\rightarrow W_i = C_{pi} \times q_p(z_i)$$

- C_{pi} (Sucção) = - 0,3
(Pressão) = + 0,2
- $q_p = c_e(z) \times q_b = 0,455625 \times 1,9 = 0,866 \text{ kN/m}^2$
 - ✓ $q_b = 0,5 \times 1,25 \times V_b^2 = 455,625 \text{ N/m}^2$
 - $V_b = 1 \times 1 \times V_{b,0} = 27 \text{ m/s}$
 $V_{b,0} = 27 \text{ m/s}$ – Santarém encontra-se na zona A
 - ✓ $c_e = 1,9$
 - Categoria de terreno – Zona III
 - Altura do edifício – 13 metros

$$\rightarrow W_e = C_{pe} \times q_p(z_e)$$

- $q_p(z_e) = 0,866 \text{ kN/m}^2$
- C_{pe} de acordo com a Tabela 42,

⁸ De madeira de Eucalipto, pelo que se usa a densidade da espécie mais comum da Península Ibérica - *Eucalyptus globulus* – $\rho_{\text{mean}} = 7 \text{ kN/m}^3$

Tabela 42 – Coeficientes de pressão exterior para a cobertura do Asilo Militar de Runa

	Zona			
	G	H	I	J
C_{pe1}	-0.47	-0.19	-0.39	-0.49
C_{pe2}	0.70	0.41	0.00	0.00

α	31°
----------	-----

O valor final de pressão w , na cobertura, tem em conta a situação mais desfavorável da combinação das pressões interiores w_i e exteriores w_e (Figura 63),

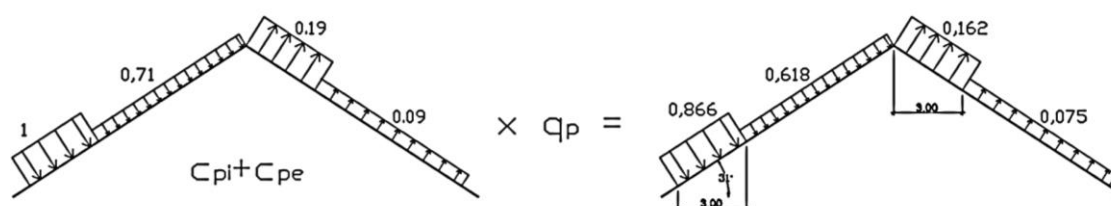


Figura 63 – Valor final de pressão da cobertura do Asilo Militar de Runa

Os valores de pressão obtidos resultam na carga distribuída pelas varas presente na Figura 64, que por sua vez transmitem as cargas pontuais da Figura 65 ao longo da madre. Estas transmitem à asna as cargas representadas na Figura 66.

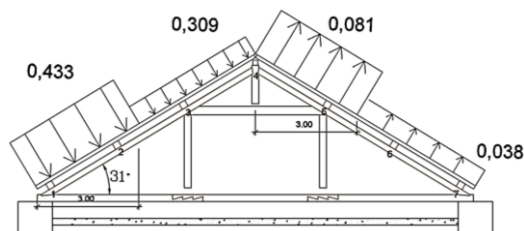


Figura 64 – Ação do vento nas varas em kN/m

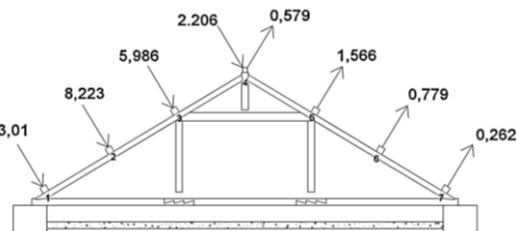


Figura 65 – Cargas pontuais transmitidas das varas às madres em kN

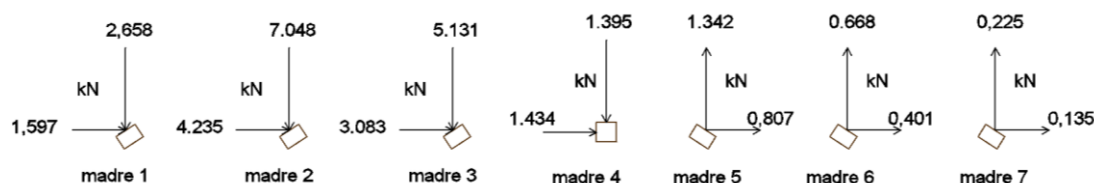


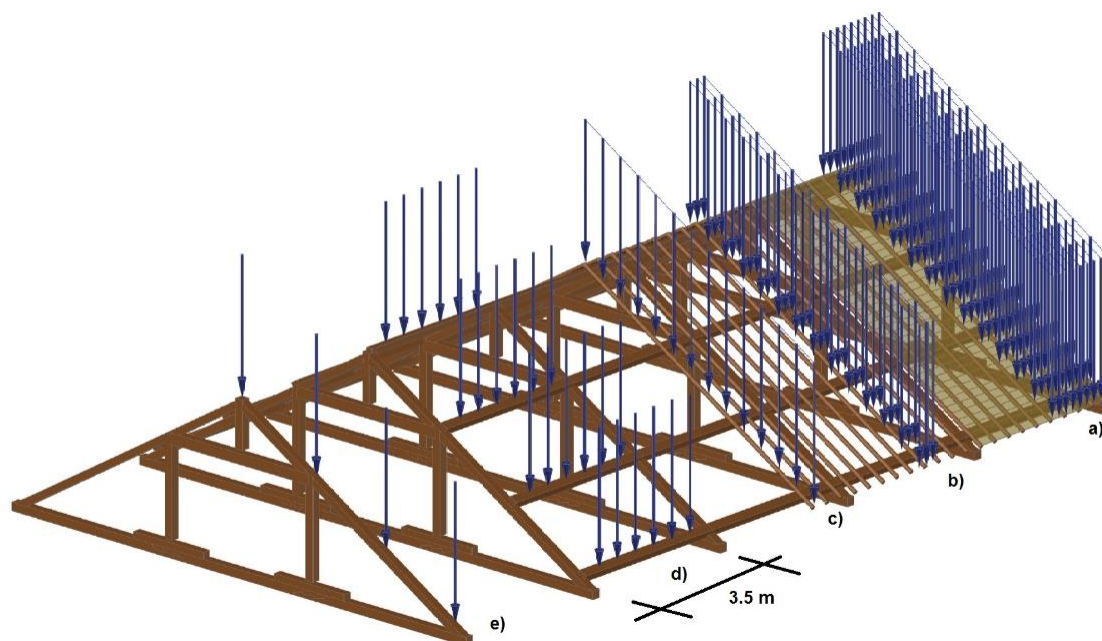
Figura 66 – Esforços atuantes nas madres devido à ação do vento

4.3.3.3. Modelo de Cálculo

O modelo utilizado na construção de Runa é diferente dos casos anteriores, uma vez que utiliza a *vara* como elemento intermédio entre a cobertura e a estrutura. Assim ao carregamento da cobertura multiplica-se a área de influência da *vara* (0,5 m). As *varas*, por sua vez, são apoiadas

nas quatro madres que constituem a estrutura, e ligam longitudinalmente as asnas. São nestes quatro apoios que se transmitem as cargas às madres e destas à asna, através das *pernas*.

No que diz respeito à carga inferior, uma vez que não existe teto apoiado na linha, importa considerar apenas as cargas que atuam no pavimento da cobertura. Neste caso para a quantificação das ações deve-se ter em conta o afastamento de 3,5 metros entre asnas, .



- | | |
|---|--|
| a) Carga distribuída pela cobertura – kN/m^2 ; | d) Carga transmitida das varas às madres – kN ; |
| b) Área de influência de uma vara e respetiva carga; | e) Reações das madres na asna – kN . |
| c) Carga distribuída na cara – kN/m ; | |

Figura 67 – Modelo de encaminhamento das cargas do Asilo Militar de Runa – desenho do autor

As ações totais que chegam à estrutura através das madres, dividem-se em cargas verticais R_{IV} e cargas horizontais, R_{IH} , Figura 68. A carga distribuída R_{pav} refere-se à carga atuante sobre o pavimento da asna.

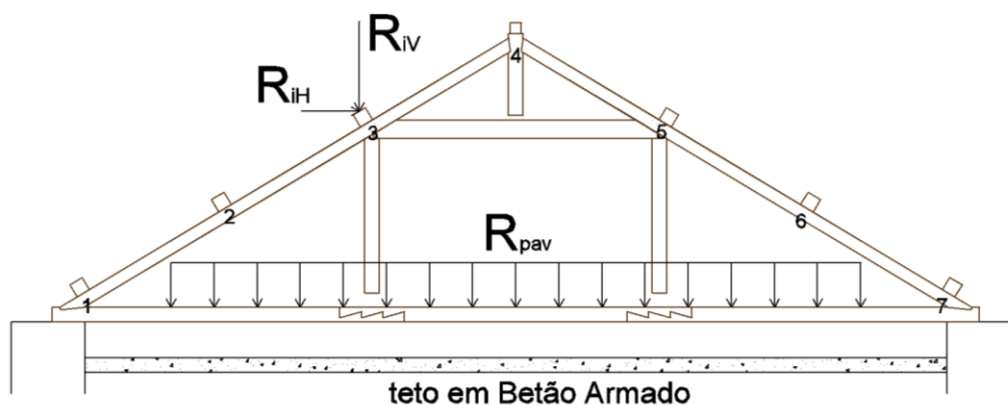


Figura 68 - Esforços atuantes na asna-tipo do Asilo Militar de Runa

- Modelo Estrutural

Este modelo é mais simples que os dos casos anteriores, pois trata-se uma asna *palladiana* singela, constituída apenas por *perna*, elemento este que preenche toda a pendente da estrutura, suportando as cargas da cobertura de forma integral. Na Figura 69 para além de se observar o modelo numérico, também é possível identificar a distribuição de cargas pela estrutura e a forma como são introduzidas.

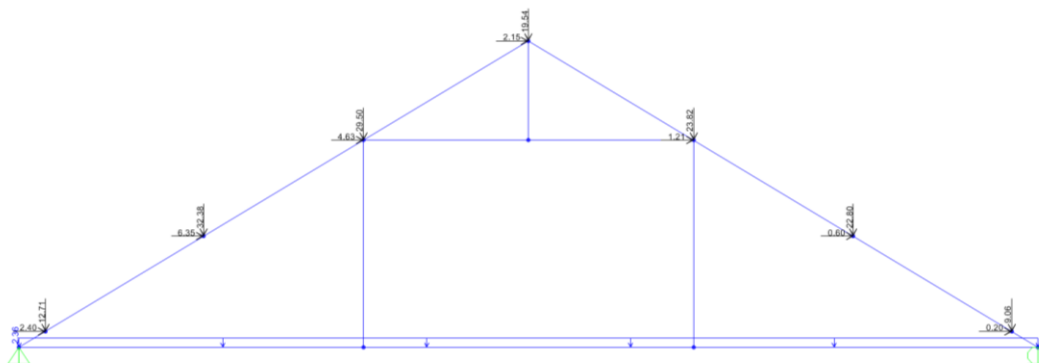


Figura 69 – Modelo numérico 2D da asna do Asilo Militar de Runa

Na Figura 70 observa-se o modelo 3D da asna, com a ligação entre elementos em destaque.

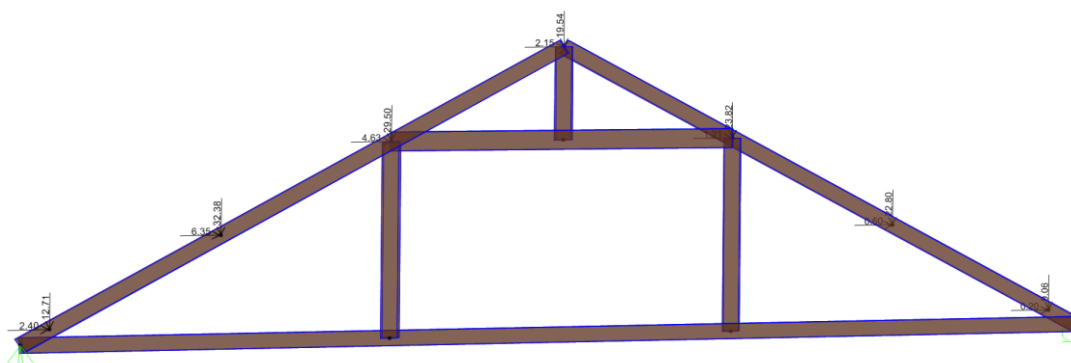


Figura 70 – Modelo 3D da asna do Asilo Militar de Runa

4.3.3.4. Cargas Atuantes

Definido o modelo numérico e quantificadas as ações atuantes na estrutura, obtém-se os valores das ações de cálculo com base no modelo de cálculo apresentado na secção 4.3.3.3. Estas ações nas madres estão identificados na Tabela 43 e na Tabela 44, ou sobre o pavimento da cobertura, na Tabela 45.

Tabela 43 – Ações atuantes nas madres relativos à carga permanente e sobrecarga

Comb.	P _{sd} [kN/m ²]	@varas [m]	@asnas [m]	@madres [m]	P _{sd} /vara [kN/m]	p _{pmadre} [kN/m]	R _{1e7} [kN]	R _{2,3,5,6} [kN]	R ₄ [kN]
[1]	2.558				1.353	0.2862	10.856	27.657	21.712
[2]	1.958	0.5	3.5	2.3	1.053	0.2862	8.726	21.802	17.452
[3]	1.850				0.980	0.210	7.877	20.042	15.754
[4]	1.450				0.780	0.210	6.458	16.139	12.916

Tabela 44 – Ações totais atuantes nas madres

Comb.	Madre 1		Madre 2		Madre 3		Madre 4		Madre 5		Madre 6		Madre 7	
	R _v [kN]	R _h [kN]	R _v [kN]	R _h [kN]	R _v [kN]	R _h [kN]	R _v [kN]	R _h [kN]	R _v [kN]	R _h [kN]	R _v [kN]	R _h [kN]	R _v [kN]	R _h [kN]
[1]	13.25	1.44	34.00	3.81	32.27	2.77	22.97	1.29	28.87	0.73	28.26	0.36	11.06	0.12
[2]	12.71	2.40	32.37	6.35	29.50	4.62	19.54	2.15	23.82	1.21	22.80	0.60	9.06	0.20
[3]	9.47	0.96	24.27	2.54	23.12	1.85	16.59	0.86	20.85	0.48	20.44	0.24	8.01	0.08
[4]	9.12	1.60	23.19	4.24	21.27	3.08	14.31	1.43	17.48	0.81	16.81	0.40	6.68	0.13

Tabela 45 – Carga atuante no pavimento da cobertura

Combinação	@ asnas [m]	R _{pav} [kN/m]
[1]		8.575
[2]	3.5	2.363
[3]		3.150
[4]		1.750

4.3.3.5. Resultados e Verificações de Segurança Estrutural

Após a introdução das cargas no modelo, calcularam-se os esforços máximos em cada elemento, para cada uma das combinações relativas ao estado limite último, Tabela 46.

Tabela 46 – Esforços internos relativos ao estado limite último

Elemento	Comb. [1]				Comb. [2]			
	M máx [kNm]	V máx [kN]	N máx [kN]	N em M Máx [kN]	M máx [kNm]	V máx [kN]	N máx [kN]	N em M Máx [kN]
Linha	19.84	23.65	183.44	183.44	12.56	9.59	125.12	125.12
Pendural	0.00	0.00	37.75	-	0.00	0.00	18.95	-
Pendural Sup.	0.00	0.00	3.10	-	0.00	0.00	2.47	-
Perna	32.90	22.99	-215.38	-209.41	34.15	23.47	-139.50	-134.62
Nível	2.07	1.37	-174.07	-	1.42	1.06	-116.93	-

Na Tabela 47 apresentam-se os valores dos deslocamentos dos elementos condicionantes, quando consideradas as combinações referentes ao estado limite de serviço.

Tabela 47 – Deslocamentos relativos ao estado limite de serviço

		w_{inst_G} [m]	w_{inst_Q1} [m]	w_{inst_Q2} [m]
Comb [3]	Linha	0.0067	0.0042	0.0112
	Perna Inf.	0.0213	0.0060	0.0176
Comb. [4]	Linha	0.0067	-	0.0187
	Perna Inf.	0.0213	-	0.0294

Com os resultados obtidos é necessário efetuar as verificações de segurança segundo o Eurocódigo 5, para os estados limite último e de serviço, salientando-se o facto da linha estar reforçada nas zonas de ligação ao pendural. Por ser este o local de momentos máximos, considerou-se um módulo de flexão de 0,00533 m³, visto a linha ter aproximadamente 40 cm de altura, nesta zona.

- Verificações ao Estado Limite Último

Tal como nos casos anteriores, os valores das resistências são afetados pelo coeficiente k_{mod} , com o valor de 0,6 referente à ação da carga permanente (valor condicionante).

Verificação	Comb./Elemento(s) condicionante(s)	Condição a verificar			
[1]		$\sigma_{t,0,d} = N/A$ [MPa]	\leq	$f_{t,0,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Linha	4.59	\leq	7.06	✓
[2]		$\sigma_{c,0,d} = N/A$ [MPa]	\leq	$f_{c,0,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Perna	5.38	\leq	9.91	✓
	Comb [1] - Nível	4.64	\leq	9.91	✓
[3]		$\sigma_{m,d} = M/w$ [MPa]	\leq	$f_{m,d}$ [MPa]	
	Comb [2] - Perna	25.61	\leq	11.769	✗
[4]		$\tau_d = \frac{3 V_{ed}}{2 A x k_{cr}}$ [MPa]	\leq	$f_{v,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Linha	.662	\leq	1.232	✓
[5]		$\sigma_{t,0,d}/f_{t,0,d}$	+	$\sigma_{m,d}/f_{m,d}$	≤ 1
	Comb [2] - Linha	0.221	+	0.2	= 0.422 ✓
[6]		$(\sigma_{c,0,d}/f_{c,0,d})^2$	+	$\sigma_{m,d}/f_{m,d}$	≤ 1
	Comb [2] - Perna	0.115		2.176	= 2.292 ✗
[6.1]	Comb [2] - Perna	L_{cr}		5.0	
		λ		86.603	

$$\begin{array}{rclcl}
 \lambda_{rel} & & 1.59 & > 0.3 & \mathbf{X} \\
 \text{Verificação adicional ->} & \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cy}f_{c,0,d}} & + & \sigma_{m,d}/f_{m,d} & \leq 1 \\
 & 2.273 & + & 2.176 & = 4.449 \quad \mathbf{X} \\
 & k_y & = & 3.158 & \\
 & k_{cy} & = & 0.149 &
 \end{array}$$

Ao contrário dos casos anteriores, a asna da cobertura do Asilo Militar de Runa não verifica a segurança estrutural em 3 dos 8 pontos do Eurocódigo 5.

- Verificações ao Estado Limite de Serviço

Os resultados apresentados na Tabela 49 referem-se às deformações instantânea e final, relativas às combinações de ações [3] e [4], nos elementos condicionantes, para o Estado Limite de Serviço. Na Figura 71 observam-se os comprimentos dos elementos condicionantes na verificação do ELS.

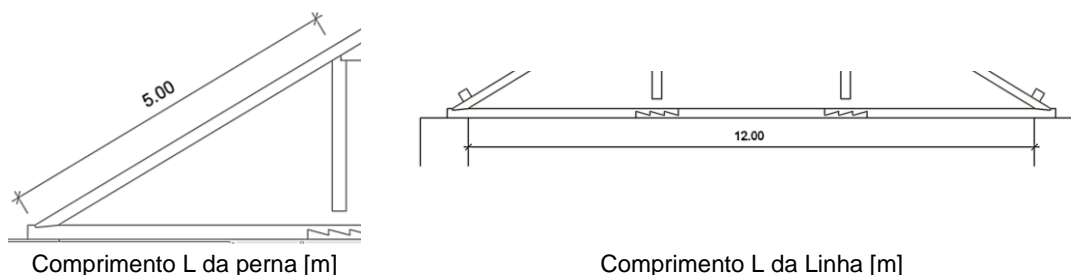


Figura 71 - Comprimento dos elementos em análise

De forma a verificar a segurança das deformações instantânea w_{inst} , e deformação final w_{fin} , os resultados da Tabela 49 são comparados com os valores limite da Tabela 48, concluindo-se que em ambas as combinações de ações estes valores são ultrapassados na *perna*, para a deformação instantânea devido às cargas permanentes, G, e devido à ação do vento, Q_2 .

Tabela 48 – Valores-limite de deformação instantânea e final

w_{inst}	\leq	Linha	0.0400	e	0.0240
		Perna	0.0167		0.0100
w_{fin}	\leq	Linha	0.0800	e	0.0400
		Perna	0.0333		0.0167

Tabela 49 - Valores de deformação instantânea e final

		L	w_{inst_G} [m]	w_{inst_Q1} [m]	w_{inst_Q2} [m]	w_{fin} [m]
Comb [3]	Linha	12	0.0067	0.0042	0.0112	0.0217
	Perna	5	0.0213	0.0060	0.0176	0.0507
Comb [4]	Linha	12	0.0067	-	0.0187	0.0294
	Perna	5	0.0213	-	0.0294	0.0635

5. Discussão e Análise de Resultados

A análise dos três *casos de estudo*, permite, apesar das diferenças entre si, identificar os principais elementos neste tipo de estruturas de cobertura, bem como conhecer qual a função estrutural de cada elemento da asna *palladiana*.

A asna *palladiana*, quando construída de acordo com os modelos antigos da carpintaria romana, como nos casos da igreja de S. Roque e da Sé Catedral de Santarém, inclui um elemento que faz toda a diferença no comportamento estrutural da mesma – a *contraperna*. Apesar deste não ser o elemento mais solicitado, é este que possibilita a uniformização e degradação dos esforços de flexão, transmitindo as cargas das madres à perna, e permitindo que a estrutura seja solicitada sobretudo a esforços axiais.

Nos casos em que não existe *contraperna* (caso do Asilo Militar de Runa), a estrutura tem tendência a ser solicitada a esforços de flexão, embora neste caso possa haver uma exceção, caso as cargas sejam introduzidas apenas nos nós da asna e esta, tal como as mais comuns (referidas anteriormente), trabalhe essencialmente sob o efeito de esforços axiais. Caso se introduzam cargas fora dos nós – tal como no caso do Asilo Militar de Runa, predominam, e são condicionantes, os esforços de flexão.

Quanto às deformações, estas são controladas por elementos adjacentes à estrutura, que não são muito solicitados, mas que desempenham uma função secundária de suporte. São os casos das escoras da asna da igreja de S. Roque (suportam as pernas diminuindo o seu comprimento efetivo de deformação) assim como dos pendurais, que embora solicitados à tração, desempenham o papel de suporte da linha, impedindo elevadas deformações da mesma. Nos casos onde há introdução de cargas nos elementos e não exista um escoramento eficaz esta deformação acentua-se e condiciona a segurança da estrutura – caso do Asilo Militar de Runa.

O primeiro resultado global a retirar do comportamento deste tipo de estruturas está indicado na Figura 72, que representa um diagrama qualitativo de esforços axiais. Adotando a mais comum e típica asna *palladiana*, fazem-se representar as solicitações a esforços axiais através de um diagrama de cores qualitativo, em que, a azul se representam os esforços de tração, e a vermelho os esforços de compressão. Dentro de cada um destes a intensidade do esforço resultante é relativa ao valor máximo, representado por cores mais escuras. À medida que a intensidade relativa do esforço em análise diminui a intensidade da cor também diminui, passando a mais clara.

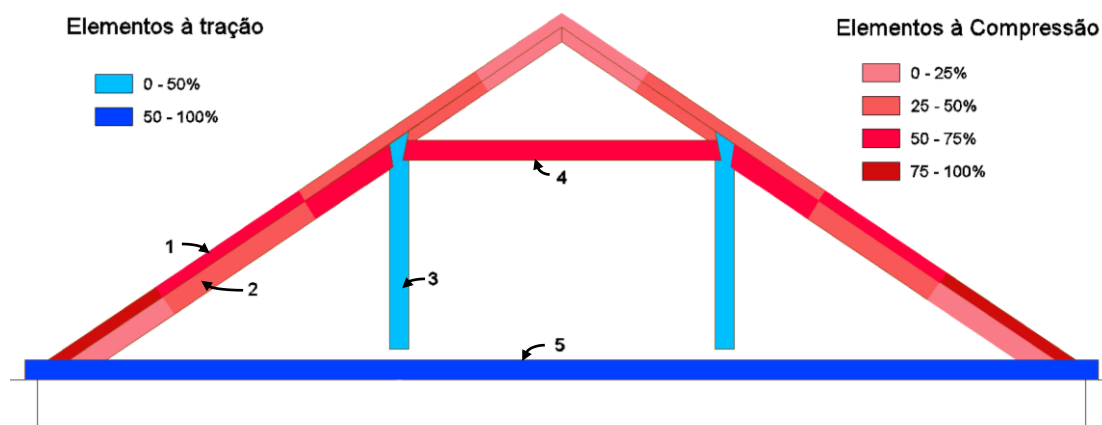


Figura 72 – Diagrama qualitativo de esforços axiais da asna *palladiana*

Nesta análise global, inclui-se a função que cada elemento tem neste tipo de estrutura, visto ser possível extrapolar dos casos particulares estudados para a generalidade destas estruturas. Assim, na Tabela 50 apresenta-se a principal solicitação e a função dos elementos que constituem a asna *palladiana*.

Tabela 50 – Principais funções dos elementos constituintes da asna *palladiana*

	Elemento	Solicitação principal	Função
1	Contraperna	Compressão	Recebe as cargas das <i>madres</i> degradando-as para a <i>perna</i> – uniformiza os esforços de flexão da estrutura
2	Perna	Compressão	Articulada entre a linha, o nível e o topo da asna ligando-se em esquadria com a <i>perna</i> contrária. Tem esforços de compressão semelhantes ao <i>nível</i> , degradando-os para a contraperna através da ligação continua que há entre ambas
3	Pendural	Tração	Elemento que funciona à tração apenas por servir de apoio à <i>linha</i> , diminuindo os esforços desta, assim como a sua deformação
4	Nível	Compressão	Elemento que funciona à compressão impedindo a flexão da <i>perna</i> , controla também a deformação deste elemento
5	Linha	Tração/Flexão	Recebe a componente horizontal dos esforços de compressão da <i>perna</i> e <i>contraperna</i> , impedindo a abertura da asna. Também funciona à flexão uma vez que também é solicitada por cargas quer do teto, quer do pavimento instalado na cobertura.

5.1. Análise dos Resultados dos *Casos de Estudo*

Após serem efetuadas as verificações de segurança relativas aos três *casos de estudo*, importa agora analisar em particular cada uma delas e perceber o que conduziu aos resultados obtidos.

Começando por analisar os resultados das verificações de estados limite últimos, na Tabela 51, apresentam-se as verificações efetuadas segundo o Eurocódigo 5 e indica-se para cada caso de estudo se cumpre ou não os critérios de segurança. Nos casos de estudo 1 e 2, igreja de São Roque e Sé Catedral de Santarém, ambas as estruturas cumprem todos os requisitos

regulamentares, ao contrário do Asilo Militar de Runa, que apenas cumpre dois pontos do regulamento Eurocódigo 5.

Tabela 51 – Resultados das verificações de segurança de estado limite último para os casos de estudo

Verificação	Caso de Estudo 1 S. Roque	Caso de Estudo 2 Sé de Santarém	Caso de Estudo 3 Asilo Militar Runa
[1] Tração	Verifica	Verifica	Verifica
[2] Compressão	Verifica	Verifica	Verifica
[3] Flexão	Verifica	Verifica	Não Verifica
[4] Corte	Verifica	Verifica	Não Verifica
[5] Flexão e Tração	Verifica	Verifica	Não Verifica
[6] Flexão e Compressão	Verifica	Verifica	Não Verifica
[6.1] Estabilidade	Verifica	Verifica	Não Verifica

No que respeita à verificação de estados limite de serviço, na Tabela 52 analisam-se as deformações para a combinação condicionante. Tal como nas verificações de estado limite último, os casos de estudo 1 e 2 cumprem as normas regulamentares, ao contrário do Asilo Militar de Runa, que falha na verificação de segurança da *perna*.

Tabela 52 – Resultados das verificações de segurança de estado limite de serviço para os casos de estudo

Caso de Estudo [Comb.]	1 – Igreja de S. Roque [3]		2 - Sé Catedral de Santarém [4]		3 - Asilo Militar de Runa [4]	
Elemento	Linha	Perna	Linha	Perna	Linha	Perna
W_{inst_G}	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Não Verifica
W_{inst_Q1}	Verifica	Verifica	-	-	-	-
W_{inst_Q2}	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Não Verifica
W_{fin}	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Verifica	Não Verifica

Assim, das Tabela 51 e Tabela 52, é possível concluir que o caso do Asilo Militar de Runa é o mais crítico em termos de segurança, uma vez que apresenta deficientes resultados, tanto para o estado limite último, como de serviço.

Para que seja possível comparar os resultados obtidos e perceber o porquê dos mesmos apresenta-se nas Tabela 53 e 4 os esforços obtidos nos três *casos de estudo*.

Tabela 53 – Comparação dos esforços axiais entre os três casos de estudo

	Caso de Estudo 1 S. Roque			Caso de Estudo 2 Sé Santarém			Caso de Estudo 3 Runa		
	Esforço elemento [kN]	% esforços internos		Esforço elemento [kN]	% esforços internos	% face asna padrão	Esforço elemento [kN]	% esforços internos	% face asna padrão
Linha Pendural	451.56	100.00%		201.89	100.00%	44.71%	183.44	100.00%	40.62%
	88.57	19.61%		51.67	25.59%	58.34%	37.75	20.58%	42.62%
Perna	-276.51	74.60%		-214.26	86.73%	71.28% ¹	-215.38	100.00%	77.89%
Contraperna	-370.67	100.00%		-247.03	100.00%		-	-	-
Nível	-277.49	74.86%		-173.38	70.19%	62.48%	-174.07	80.82%	62.73%

- Esforço no elemento - Máximo esforço obtido no elemento para a combinação condicionante
- % esforços internos - percentagem de esforço relativa ao elemento de maior esforço com igual solicitação (ex: tração - Linha; Compressão - Contraperna)
- % face asna padrão - percentagem de esforço relativamente à asna da igreja de S. Roque - asna com maiores solicitações

Tabela 54 – Comparação dos esforços de flexão entre os três casos de estudo

	Caso de Estudo 1 S. Roque			Caso de Estudo 2 Sé Santarém			Caso de Estudo 3 Runa		
	Esforço elemento [kN]	% esforços internos		Esforço elemento [kN]	% esforços internos	% face asna padrão	Esforço elemento [kN]	% esforços internos	% face asna padrão
Linha	55.12	100.00%		29.25	100.00%	53.07%	19.84	100.00%	35.99%
Perna	21.00	38.10%		13.94	47.66%	66.38%	34.15	172.13%	162.62%
Contraperna	6.52	11.83%		3.63	12.41%	55.67%	-	-	-

- Esforço no elemento - Máximo esforço obtido no elemento para a combinação condicionante
- % esforços internos - percentagem de esforço relativa à Linha (elemento que geralmente é mais solicitado à flexão)
- % face asna padrão - percentagem de esforço relativamente à asna de S. Roque - asna com maiores solicitações

Tendo em conta os resultados apresentados, ainda que as estruturas tenham vãos, afastamentos entre asnas e geometria diferentes, é possível afirmar que, face às restantes, as asnas da igreja de S. Roque são as mais solicitadas, seguindo-se as da Sé Catedral de Santarém e finalmente as do Asilo Militar de Runa. Outra análise que se pode efetuar é a percentagem de esforço em determinado elemento face a outro mais solicitado, com função semelhante. Por último consegue-se ainda saber a relação de esforços entre elementos de asnas diferentes, tendo como referência a asna mais solicitada.

- Análise dos Esforços Axiais – Tabela 53

- Esforços internos - no que diz respeito à tração, a *linha* é o elemento de referência. Quanto aos esforços internos do *pendural* as percentagens entre asnas são semelhantes, sofrendo este

¹ Nesta % os esforços da *perna* e *contraperna* são somados, para que seja possível ter termo de comparação com a asna de Runa.

esforços de tração de 19 a 25% da linha. Quanto à compressão, nos *casos de estudo* 1 e 2 o elemento de referência é a *contraperna*, sendo que no caso da igreja de S. Roque, por a estrutura conter escoras de ligação à *perna*, este elemento é menos solicitado à compressão que no caso da Sé de Santarém. No caso do Asilo Militar de Runa, não existe *contraperna*, o que faz com que seja a *perna* a absorver a totalidade dos esforços de compressão.

- Esforços relativos à asna padrão – de acordo com a geometria e vão, era de esperar que o *caso de estudo* do Asilo Militar de Runa tivesse menores percentagens de esforço face à asna padrão e que o caso da Sé Catedral de Santarém estivesse em situação intermédia – o que acontece na *linha* e *pendural*. Quanto aos elementos comprimidos, o mesmo não acontece uma vez que Runa apresenta um modelo distinto e o facto de não ter *contraperna* aumenta os esforços no *nível* (tem a mesma percentagem que o caso da Sé Catedral de Santarém face à asna padrão), e na *perna* (maior % de esforço que o caso da Sé Catedral de Santarém face à asna padrão).

- Análise dos Esforços de Flexão – Tabela 54

- Esforços internos – a *linha* é o elemento que deveria sofrer maior solicitação à flexão, sendo por isso tido como elemento de referência. Quanto aos casos da igreja de S. Roque e da Sé Catedral de Santarém, obtêm-se resultados expectáveis, com a *contraperna* a ser o elemento menos solicitado à flexão, e a *perna* num nível intermédio, mas ambos com percentagens bastantes inferiores à da *linha*. Já no caso do Asilo Militar de Runa isto também não se verifica, uma vez que a flexão da *perna* é superior à da *linha*. Por esta razão esta asna não verifica a segurança ao estado limite último de flexão. No caso do Asilo Militar de Runa existe uma *madre* que transmite cargas a meio vão da *perna*, e não existindo *contraperna* para degradar estes esforços de flexão para a *perna*, este elemento, é solicitado à flexão e compressão simultaneamente.

- Esforços relativos à asna padrão – Como no esforço axial, era expectável a solicitação à flexão do caso da Sé Catedral de Santarém, intermediar o caso da igreja de S. Roque – asna padrão, e o caso do Asilo Militar de Runa – asna de menor dimensão. Tal acontece na *linha* mas não acontece na *perna*, visto este elemento ser inclusivamente mais solicitado que à flexão que a asna padrão.

Outro dos fatores condicionantes na verificação de segurança em estruturas de madeira é o estado limite de utilização, uma vez que a madeira tem um módulo de elasticidade baixo quando comparado com as capacidades de resistência na direção do veio. Por outro lado, a madeira tem grande fluência, e as deformações finais, por vezes, duplicam as flechas instantâneas, o que condiciona e muito o dimensionamento deste tipo de estruturas. Uma vez que no caso do Asilo Militar de Runa não é verificada a segurança em relação à deformação, compara-se esta com os outros casos de estudo, como se apresenta na Tabela 55.

Tabela 55 - Comparação de deformações entre os três casos de estudo

	Caso de Estudo 1 S. Roque	Caso de Estudo 2 Sé Santarém		Caso de Estudo 3 Runa	
	Deformação elemento [m]	Deformação elemento [m]	% Face asna padrão	Deformação elemento [m]	%Face asna padrão
Linha	0.0137	0.0112	81.47%	0.0217	157.82%
Perna	0.0113	0.0098	86.67%	0.0507	448.38%

% face asna padrão - percentagem de esforço relativamente à asna de S. Roque - asna que deveria ter maiores solicitações

Como nos casos anteriores define-se a igreja de S. Roque como asna padrão, sendo as deformações da Sé Catedral de Santarém inferiores a esta (como seria expectável), mas, mais uma vez o mesmo não acontece com o Asilo Militar de Runa, com deformações cinco vezes superiores às da igreja de S. Roque, na *perna*. Isto acontece por este elemento ser fortemente solicitado à flexão com a introdução de uma carga a meio vão do mesmo, mas também por ter uma inércia substancialmente inferior aos casos da igreja de S. Roque e da Sé Catedral de Santarém, em que a *contraperna* e *perna*, ligadas entre si, resultam numa menor deformação final.

5.2. Proposta de Reforço da Asna do Asilo Militar de Runa

Como foi referido a asna do Asilo Militar de Runa é a mais condicionada em termos das verificações de segurança. Assim, propõe-se uma solução de reforço da mesma, tendo em vista a verificação de segurança segundo o Eurocódigo 5. O reforço deve manter as características da asna, assim como o tipo de utilização da mesma, não devendo afetar o espaço amplo existente na cobertura.

Uma vez que o principal problema da asna se deve a esforços de flexão, sobretudo na *perna*, a solução encontrada passa pela introdução de escoras diagonais que suportem a carga proveniente das madres 2 e 6. As escoras ligam o pendural à perna, no local onde assenta a madre e para que o pendural não seja alvo de deformações devido à carga que recebe das escoras, reforça-se a zona entre pendurais, por baixo da estrutura de pavimento da cobertura, com uma escora horizontal que tem apenas como objetivo absorver a componente horizontal das escoras diagonais introduzidas. Com esta solução garante-se, também, o reforço à flexão da *perna* desde que estes elementos fiquem devidamente ligados entre si.

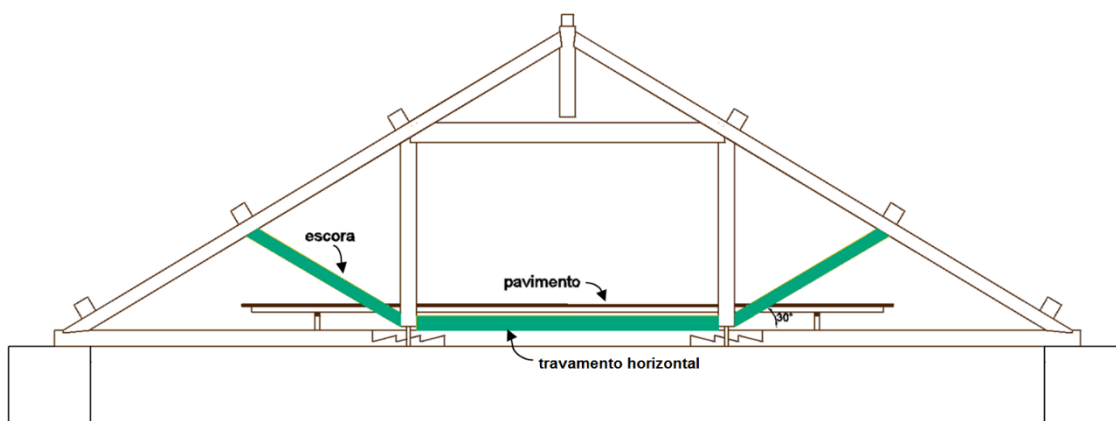


Figura 73 - Solução de reforço da asna do Asilo Militar de Runa

Através de um pré-dimensionamento simples, adotaram-se seções (bxh) de 15x20 cm na escora diagonal e escora horizontal. Após a introdução destes elementos no modelo, Figura 74, chegaram-se aos esforços e deformações das Tabela 56 e Tabela 57.

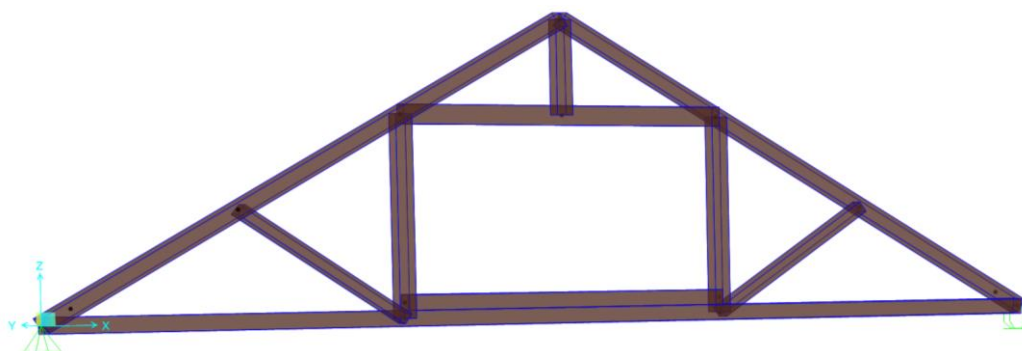


Figura 74 - Modelo numérico da solução de reforço de Runa

Tabela 56 - Esforços internos da asna do Asilo Militar de Runa com reforço

Elemento	Comb. [1]				Comb. [2]			
	M máx [kNm]	V máx [kN]	N máx [kN]	N em M máx [kN]	M máx [kNm]	V máx [kN]	N máx [kN]	N em M Máx [kN]
Linha	15.57	16.31	208.85	176.89	8.89	7.83	153.24	119.28
Pendural	0.00	0.00	59.70	-	0.00	0.00	33.17	-
Pendural Sup.	0.00	0.00	2.60	-	0.00	0.00	2.00	-
Perna	4.13	11.05	-237.85	-24.91	7.13	10.33	-164.40	-18.98
Nível	1.55	1.12	-153.54	-	0.93	0.82	-97.45	-
Escora Diagonal	0.00	0.00	-39.88	-	0.00	0.00	-41.52	-

Tabela 57 - Deformações da asna do Asilo Militar de Runa com reforço

		L	W _{inst_G} [m]	W _{inst_Q1} [m]	W _{inst_Q2} [m]	W _{fin} [m]
Comb [3]	Linha	12	0.0069	0.0043	0.0076	0.0199
	Perna	5	0.0029	0.0012	0.0072	0.0101
Comb [4]	Linha	12	0.0069	-	0.0121	0.0231
	Perna	5	0.0029	-	0.0098	0.0144

Uma vez obtidos novos valores de esforços e deformações, fez-se, de novo, as verificações de segurança referidas na seção 3.2.

- Verificações ao Estado Limite Último

Verificação	Comb./Elemento(s) condicionante(s)	Condição a verificar			
[1]		$\sigma_{t,0,d} = N/A$ [MPa]	\leq	$f_{t,0,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Linha	5.22	\leq	7.06	✓
[2]		$\sigma_{c,0,d} = N/A$ [MPa]	\leq	$f_{c,0,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Perna	5.95	\leq	9.91	✓
	Comb [2] – Escora Diag.	1.38	\leq	9.91	✓
[3]		$\sigma_{m,d} = M/w$ [MPa]	\leq	$f_{m,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Linha	2.919	\leq	11.77	✓
[4]		$\tau_d = \frac{3 V_{ed}}{2 A x k_{cr}}$ [MPa]	\leq	$f_{v,d}$ [MPa]	
	Comb [1] - Linha	0.913	\leq	1.232	✓
[5]		$\sigma_{t,0,d}/f_{t,0,d}$	+	$\sigma_{m,d}/f_{m,d}$	≤ 1
	Comb [1] - Linha	0.313	+	0.248	= 0.561 ✓
[6]		$(\sigma_{c,0,d}/f_{c,0,d})^2$	+	$\sigma_{m,d}/f_{m,d}$	≤ 1
	Comb [1] - Perna	0.004		0.263	= 0.267 ✓
[6.1]	Comb [1] - Perna	L_{cr}		5	
		λ		86.603	
		λ_{rel}		1.59	> 0.3 ✗
	Verificação adicional ->	$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cy} f_{c,0,d}}$	+	$\sigma_{m,d}/f_{m,d}$	≤ 1
		0.421	+	0.263	= 0.684 ✓
		k_y	=	3.158	
		k_{cy}	=	0.149	

Neste caso, após a inclusão do reforço, nota-se que em todos os pontos em verificação está assegurada a segurança estrutural.

- Verificações ao Estado Limite de Serviço

Comparando os valores obtidos da Tabela 59 com os valores limite da Tabela 58, conclui-se que nenhuma das deformações excede estes valores, estando garantida a segurança da asna ao Estado Limite de Serviço.

Tabela 58 - Valores limite de deformação instantânea e final

W_{inst}	\leq	Linha	0.0400	e	0.0240
		Perna	0.0167		0.0100
W_{fin}	\leq	Linha	0.0800	e	0.0400
		Perna	0.0333		0.0167

Tabela 59 - Valores de deformação instantânea e final da solução reforçada

		L	W_{inst_G} [m]	W_{inst_Q1} [m]	W_{inst_Q2} [m]	W_{fin} [m]
Comb [3]	Linha	12	0.0069	0.0043	0.0076	0.0199
	Perna	5	0.0029	0.0012	0.0072	0.0101
Comb [4]	Linha	12	0.0069	-	0.0121	0.0231
	Perna	5	0.0029	-	0.0098	0.0144

A solução adotada é, então, uma boa possibilidade de reforço da asna de Runa. Tal reforço, deveria ser executado, uma vez que a estrutura pode tornar-se instável face às ações que a solicitam.

Depois de estudada e analisada a asna do Asilo Militar de Runa percebe-se o porque da inclusão de alguns elementos em algumas partes da estrutura de cobertura, Figura 75. Ainda assim, as soluções improvisadas que foram adotadas durante a construção original, poderão ser insuficientes para garantir a estabilidade da estrutura, sendo necessário um estudo mais aprofundado da mesma de forma a que esta seja reforçada convenientemente.



Figura 75 - Elementos improvisados de suporte da madre – Fotografia de João Sarrazola

Como mostra a Figura 76, a linha contém já um reforço na zona do pendural, não se percebendo se este é da mesma época da construção da asna. Este reforço apresenta um comprimento superior a 2 metros e garante o reforço de toda a zona da linha que é afetada por momentos negativos. Nota-se, ainda, na Figura 76 que toda a cobertura já descaiu, uma vez que o pendural se apoia indevidamente no reforço da linha, e o estribo metálico já não suporta a linha – função para a qual foi concebido.

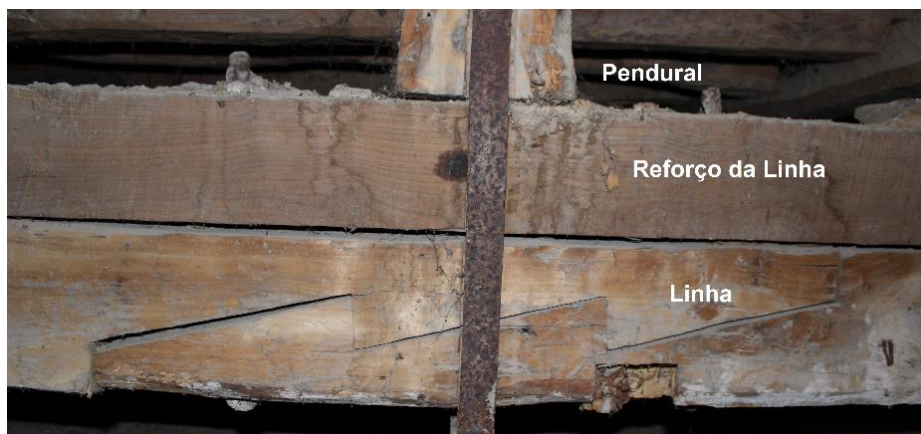


Figura 76 - Reforço da linha improvisado – Fotografia de João Sarrazola

6. Conclusões e Desenvolvimento Futuros

6.1. Conclusões

No presente trabalho pretendeu-se compreender a evolução da madeira enquanto material estrutural e como foi feita a sua aplicação em coberturas desde os primórdios da humanidade até aos dias de hoje. O estudo centrou-se no comportamento estrutural das asnas *palladianas*, trazidas para Portugal no século XV e que representam um enorme legado da construção em madeira por toda a Europa.

No capítulo 2 deste trabalho fez-se um estudo histórico do uso da madeira enquanto material estrutural, pois se este acompanhou o homem na sua evolução. Sendo um material de origem orgânica com características anisotrópicas e higroscópicas, a madeira apresenta, também, uma deficiente resistência ao corte e um baixo módulo de elasticidade, o que inflaciona as deformações. A relação entre o seu peso próprio e resistência, a boa durabilidade, boa resistência à flexão, compressão e tração na direção do veio, fazem da madeira um material passível de ombrear com os mais comuns materiais de construção, o aço e o betão.

A madeira é um material de características particulares. Cada espécie tem determinadas características e dentro da mesma espécie e árvore há diferenças que se devem ser tidas em conta no seu uso enquanto material estrutural.

Inicialmente o uso e dimensionamento de coberturas de madeira era feito de forma empírica, começando-se por coberturas simples e vãos pequenos e recorrendo-se a modelos de asna de madeira em bruto, com as dimensões das árvores colhidas. Com a evolução da civilização foi crescendo a necessidade de aumentar os espaços e vãos a vencer, e com a descoberta de ferramentas, a madeira começou a ser trabalhada pelo homem, que a transformou num dos mais sofisticados sistemas estruturais que ainda hoje existe, provando as suas características de durabilidade.

As asnas *palladianas* tiveram origem em Itália, e são do tipo de coberturas mais comuns em toda a Europa. São caracterizadas pela sua geometria e elementos constituintes, capazes de vencer grandes vãos e representam também um marco na história da construção, e em Portugal, é de referir o caso da Igreja de S. Roque.

Para que fosse possível analisar e perceber o comportamento das asnas anteriormente referidas, estudaram-se no capítulo 3 os regulamentos e normas que definem as regras de verificação da segurança estrutural de elementos de madeira. Para este material usa-se especificamente o Eurocódigo 5, que, apesar de fornecer informações e regras para o uso da madeira, não está ainda completamente desenvolvido, sendo demasiado conservativo em alguns casos e abordando alguns temas de forma ainda superficial, como é o caso da fluência da madeira.

Até se chegar às cargas e esforços internos atuantes neste tipo de estrutura é necessário caracterizar as ações ao nível da sua duração e teor em água, uma vez que da conjugação de ambos pode reduzir-se até 60% a resistência da madeira. É, também, necessário quantificar as ações atuantes bem como definir corretamente as combinações a utilizar. Para além disso, é fundamental desenvolver-se um modelo de cálculo eficaz que traduza o comportamento da estrutura. Aqui admitiram-se algumas hipóteses, considerando-se as articulações nos nós e na ligação entre alguns elementos da estrutura, e admitiu-se o comportamento elástico linear da madeira, como refere o Eurocódigo 5, apesar de este ser ainda um tema em permanente discussão.

De forma a estudar o comportamento e segurança deste tipo de estruturas efetuaram-se as verificações de segurança aos estados limite último e de serviço, mas apenas na direção do veio da madeira, uma vez que é apenas nesta direção a atuação dos esforços.

No capítulo 4 a forma encontrada para estudar o comportamento das asnas *palladianas*, foi analisar três casos de estudo, de séculos diferentes, mas com semelhanças construtivas. O estudo dos casos da igreja de S. Roque, Sé Catedral de Santarém e Asilo Militar de Runa formou um conjunto de resultados possível de extrapolar para as asnas *palladianas*, em geral, através da análise dos esforços obtidos pelo programa de cálculo automático SAP 2000®.

Este tipo de asnas de coberturas foi pensada geometricamente, para suportar cargas pontuais, transmitidas à estrutura sobretudo nas zonas de ligação entre elementos. Com o aumento dos vãos foi necessário aumentar o número de *madres* para evitar a excessiva flexão destas, o que provocou a introdução de cargas ao longo das *pernas*, passando também estas a funcionar à flexão (como são os casos da igreja de S. Roque e Sé Catedral de Santarém). Para contrariar este facto, estas estruturas possuem uma *contraperna*, com a função de aumentar a resistência à flexão da *perna* e a sua resistência à compressão. O mesmo não se verifica no Asilo Militar de Runa, onde as *madres* não são distribuídas ao longo da *perna* mas sim colocadas em pontos específicos. No entanto, o facto de um destes pontos ser a meio vão da *perna* introduz elevados esforços de flexão, situação que leva a existirem também grandes deformações neste elemento. Destes resultados, retira-se a importância da *contraperna*, elemento fundamental na uniformização e resistência a esforços de flexão da estrutura.

Outra das conclusões genéricas a retirar é que a *perna* é, em geral, o elemento mais solicitado, a esforços de compressão mas também flexão. A *linha*, que apesar de ser solicitada à tração impedindo a abertura da asna, também é solicitada à flexão sobretudo devido ao seu peso próprio e às cargas que lhe são aplicadas pelo pavimento e teto. Neste tipo de coberturas a *linha* é, em geral, suspensa no *pendural*, funcionando este à tração uma vez que lhe serve de apoio e que tem como função reduzir as suas deformações. A madeira tem comportamento diferente à compressão e à tração, pois neste caso apresenta rotura frágil, enquanto no anterior exibe um patamar de deformação enquanto a carga aumenta, o que torna a *linha* por vezes um elemento

condicionante e ao qual se deve ter especial atenção, uma vez que reúne esforços de flexão e tração.

No que toca às ligações, apesar de se considerarem articuladas, estas são parte importante no que toca à distribuição de esforços na estrutura, pois devem impedir as deformações no plano ortogonal ao plano desta, em que a ligação mais condicionante será entre a perna e a linha, pois para além de concentrarem elevados esforços, é uma zona passível de ocorrer maior deterioração. Também a modelação representa grande importância nos resultados obtidos, pois a madeira tem grande capacidade de transmitir esforços entre peças revelando elevada plasticidade nas ligações, ainda assim é necessário ter em conta se há o contacto com outros materiais.

Por último e depois de executadas as verificações de segurança segundo o Eurocódigo 5, conclui-se que as asnas das coberturas da igreja de S. Roque e Sé Catedral de Santarém verificam todos os requisitos das normas e regulamentos da atualidade, o mesmo não acontece com as asnas do Asilo Militar de Runa, onde apesar de ser uma estrutura mais simples e de menores dimensões apresenta falhas ao nível da verificação de esforços e deformações. Assim, propôs-se o reforço dessa estrutura no capítulo 5, mantendo-se as características da cobertura assim como a sua utilização, ao introduzir apenas duas escoras diagonais nas laterais da cobertura, e um travamento horizontal.

6.2. Desenvolvimentos Futuros

O trabalho desenvolvido, teve apenas como objetivo a caracterização do comportamento estrutural das asnas *palladianas*, deixando alguns pontos por analisar e que devem ser alvo de aprofundamento.

Começando pelo material em si, seria proveitoso aprofundar conhecimentos acerca do comportamento da madeira, pois as normas atuais mantêm-se conservadoras e por vezes ainda baseadas em métodos empíricos. É verdade que a madeira tem um comportamento complexo, mas existem hoje em dia meios e técnicas que, com certeza, permitirão estudar o comportamento não linear deste material assim como a sua atuação em conjunto com outros materiais.

Ainda no plano da asna, seria interessante estudar as ligações neste tipo de estrutura e verificar como é feita a distribuição de esforços nestas, assim, como a influência que pode ter este tipo de ligação na transmissão de esforços aos elementos que a constituem. Outra das temáticas interessantes de abordar acerca deste tema é o estudo do comportamento longitudinal deste tipo de coberturas, uma vez que o seu contraventamento longitudinal é apenas dependente das madres. A ligação das asnas às paredes de alvenaria também tem influência no comportamento transversal e até longitudinal, pelo que seria importante esse estudo contemplar os efeitos dos apoios das asnas.

Uma vez executada a verificação global da cobertura, incluindo longitudinalmente, poderia ser estudada a cobertura como um todo e verificado o estado limite de serviço de vibração, assim como a verificação da segurança ao fogo, temáticas que não foram abordadas por se tratar de um estudo comportamental ao nível estrutural e no plano da asna.

Por último, há a referir o elevado património histórico e cultural que Portugal apresenta de estruturas deste tipo, património este que deve ser estudado e preservado. Estas estruturas são fontes de informações e conhecimento que pode ser aplicado na atualidade, e tratando-se da madeira, de um material amigo do ambiente poderá desempenhar um papel de relevo na construção futura.

Referências Bibliográficas

- Bettioli, G. (2010). *Structural analysis of the timber roofs of the "Arsenale" of Venice*. Università Degli Studi Di Padova.
- Bluteau, R. (1712). *Vocabulário Portuguez e Latino*. Coimbra: Collegio das Artes da Companhia de Jesus.
- Cabo, M. C. F. (1996). *De los orígenes y desarrollo de las armaduras de cubierta latinas*. Paper presented at the Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Madrid.
- EN 1912:2004 - Structural timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species (2007).
- EN 338:1995 - Structural timber - Strength classes (2003).
- EN 384:1995 - Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density (2004).
- Eurocódigo - Bases para o projecto de estruturas (2009b).
- Eurocódigo 1 - Acções em estruturas, Parte 1-1: Acções gerais (2009a).
- Eurocódigo 1 - Acções em estruturas, Parte 1-4: Acções gerais - Acções do Vento (2010a).
- Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço - Parte 1-8: Projecto de Ligações (2010b).
- Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings (2006).
- Costa, F. F. d. (1955). *Enciclopédia Prática da Construção Civil - Asnas de Madeira* (Vol. I). Lisboa: Portugália Editora.
- Martins, J. S., Gago, A. S., Caldas, J. V., & Oliveira, L. (2013). Telhados e Tectos de Asnaria, uma Constante na Construção Portuguesa do Gótico ao Barroco.
- Martins, T. F. R. M. (2010). *Dimensionamento de Estruturas de Madeira*. (Mestrado), Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Mascarenhas, J. (2006). *Sistemas de Construção - VI - Coberturas Inclínadas (1ª Parte)* (Vol. VI): Livros Horizonte.
- Mateus, T. (2007). *Bases para o dimensionamento de estruturas de madeira*. Lisboa: LNEC.
- Negrão, J., & Faria, A. (2009). *Projeto de Estruturas de Madeira*. Porto: Publindústria, Edições Técnicas.
- Oliveira, N. F. M. (2009). *Teoria e Prática de Técnicas de Construção e Conservação de Coberturas do séc. XVIII: Evolução Histórica, tratadista do séc. XVIII, Diagnóstico de Anomalias e Restauro Estrutural*. (Mestrado), Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- Osa, G. G. L. d. I. (2009). *Origen Y Evolución De La Cercha*. (Master), Universidade Politécnica de Madrid.
- Palladio, A. (1570). *I Quattro Libri Dell'Architettura*. Venetia.
- Pérez, L. P. (2003, 20th-24th January 2003). *Design and construction of timber roof structures, built over different structural systems. Cases studies at the Valencia Community*. Paper presented at the First International Congress on Construction History, Madrid.
- Ramos, A. B. d. S. (2010). *Avaliação do Comportamento Mecânico de Madeira Antiga*. (Mestrado), Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto.
- Reis, A. C. d., Farinha, M. B., & Farinha, J. P. B. (2005). *Tabelas Técnicas*. Lisboa: Edições Técnicas E. T. L., L.^{da}.
- Sánchez, M. I. G. (2006). *Las Estructuras de Madera en los Tratados de Arquitectura* (S. L. Artes Gráficas Palermo Ed.). Madrid.

- Scala, D. F. d. A. Y. (1895). *Carpintería Antigua Y Moderna*. In J. Roma (Ed.), (pp. 578). Barcelona.
- Tellez, P. M. B. (1545). *Chronica da Companhia de Iesu na Provincia de Portvgal*. Lisboa.
- Valeriani, S. (2003). *Historic Carpentry in Rome*. Paper presented at the I Congreso Internacional, Madrid.
- Valeriani, S. (2006). The Roofs of Wren and Jones: A Seventeenth-Century Migration of Technical Knowledge from Italy to England. *The Nature of Evidence: How Well Do 'Facts' Travel?*, 14/06. Retrieved from Economic History website: <http://www.lse.ac.uk/collection/economichistory/>
- Vitruvio. (1914). *The Ten Books On Architecture* (M. H. Morgan, Trans.). Cambridge: Harvard University
- SAP 2000. *Static and Dynamic Finit Element Analysis of Structures. Structural AnalysisProgram*. Computers and Structures. Inc., Advanced 9.03 California.USA

Sítios Consultados na Internet

- Centro de Apoio Social de Runa (CASR) - Instituto de Ação Social das Forças Armadas. from <http://www.iasfa.pt/runa.html>
- História da Madeira. from http://clientes.netvisao.pt/alme0020/historia_madeiras.htm
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas. from http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/29.htm
- Portal da Madeira. from <http://portaldamadeira.blogspot.pt/>
- Sistema de Informação para o Património Arquitectónico from www.monumentos.pt